

UNIVERSIDAD DE PANAMÁ
"Campus Octavio Méndez Pereira"
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE QUIMICA

**“PERFILES AMBIENTALES DE MERCURIO TOTAL GASEOSO EN LA
ATMÓSFERA DE ZONAS URBANAS Y FUENTES TERMALES EN PANAMÁ,
UTILIZANDO LA ESPECTROMETRIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA
DIFERENCIAL ZEEMAN”**

POR
ALMA NUBIA ESPINOSA LÓPEZ

**Trabajo de graduación presentado a la Facultad de Ciencias Naturales,
Exactas y Tecnología como requisito para optar por el grado de Maestría en
Química con especialización en Química Analítica.**

PANAMÁ, REPÚBLICA DE PANAMÁ

2019

ASESOR:

DR. JUAN VALDÉS GONZÁLEZ

AGRADECIMIENTO

Al Dr. Juan Valdés González, por guiarme y permitirme desarrollar este trabajo, por su confianza y apoyo.

A la Universidad Tecnológica de Panamá, el Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales por permitirme hacer uso del espacio, equipo y todas las facilidades requeridas para el desarrollo de este trabajo.

A la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, SENACYT por proporcionar los fondos necesarios para la realización de este proyecto de investigación.

DEDICATORIA

A mi Dios todo poderoso por darme la vida, la salud y la capacidad para realizar esta investigación científica.

A la familia que Dios me regaló, Rogelio, Samuel y Ángela.

Ya no soy esclava del temor... Soy hija de Dios!

ÍNDICE GENERAL

SECCIÓN	PÁGINA
Agradecimiento	iii
Dedicatoria	v
Índice General	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tablas	xvi
Resumen	xviii
 Capítulo I Introducción	 1
 Capítulo II Fundamentación Teórica	 5
 2.1 Ciclo del mercurio	8
2.2 Impacto del mercurio en la salud	11
2.3 Emisiones de mercurio	12
2.3.1 Emisiones Naturales	12
2.3.2 Emisiones Antropogénicas	15
2.4 Panamá: Situación Actual	16
2.5 Técnicas de análisis de mercurio en aire	17
2.5.1 Espectrometría de fluorescencia atómica por vapor frío (CVAFS)	17
2.5.2 Espectrometría de absorción atómica diferencial Zeeman (ZAAS)	19
 Capítulo III Aspectos metodológicos	 21

3.1	Instrumentación	22
3.1.1	Analizador de Vapor de Mercurio RA-915+	22
3.1.2	Estación Meteorológica Davis Vantage PRO 2	27
3.2	Ubicación de los sitios de muestreo	28
3.3	Muestreo y análisis de las muestras	29
3.4	Tratamiento estadístico de los datos	29
Capítulo IV	Resultados y Discusión	31
4.1	Provincia de Chiriquí	32
4.1.1	Pozos de aguas termales de Cotito	33
4.1.2	Pozos de aguas termales de Caldera	35
4.1.3	Pozos de agua potable de Salud	36
4.2	Provincia de Coclé	38
4.2.1	Pozos de aguas termales de El Valle de Antón	39
4.2.2	Pozos de agua salada de La Salineta	41
4.3	Provincia de Los Santos	43
4.3.1	Pozo termal de El Cortezo	43
4.4	Provincia de Veraguas	45
4.4.1	Pozos termales de Calobre	46
4.5	Provincia de Panamá	52
4.5.1	Terminal de Transporte de Albrook	53
4.5.2	Campus de la Universidad de Panamá y Estación del metro en San Miguelito	56

Capítulo V	Conclusiones y Recomendaciones	.	.	.	62
Capítulo VI	Referencias.	.	.	.	66
ANEXO	71

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
1. Ciclo del mercurio en el ambiente. Fuente: ATSDR, 1999	9
2. Principio de operación del analizador RA-915+.	20
3. Analizador de vapor de mercurio RA-915+.	25
4. Estación meteorológica Davis Vantage PRO 2	28
5. Ubicación de los sitios de muestreo en la provincia de Chiriquí	32
6. Muestreo y análisis de MTG en los pozos termales de Cotito	33
7. Variación de la concentración promedio de MTG en Cotito, Pozo 1, 2, 3 y 4	34
8. Muestreo y análisis de MTG en los pozos termales de Caldera	35
9. Variación de la concentración promedio de MTG en las aguas termales de Caldera	36
10. Muestreo y análisis de MTG en los pozos de aguas potable de Salud, Tolé.	37
11. Variación de la concentración promedio de MTG en los Pozos de Agua Potable de Salud, Tolé.	38
12. Ubicación de los sitios de muestreo en la provincia de Coclé	39
13. Muestreo y análisis de MTG en los Pozos termales de El Valle de Antón	40
14. Variación de la concentración promedio de MTG en El Valle de Antón	41
15. Muestreo y análisis de MTG en el pozo de aguas salada, La Salineta	42
16. Variación de la concentración promedio de MTG en La Salineta el 17 de mayo de 2013.	43

17. Ubicación del punto de muestreo El Cortezo en la provincia de Los Santos.	44
18. Muestreo y análisis de MTG en el pozo de agua termal El Cortezo .	44
19. Variación de la concentración promedio de MTG en El Cortezo el 14 de Junio de 2014.	45
20. Ubicación de los sitios de muestreo en la provincia de Veraguas, Calobre.	46
21. Muestreo y análisis de MTG en los pozos de aguas termales en El Potrero	47
22. Muestreo y análisis de MTG en el pozo de agua termal en Chitrá .	48
23. Muestreo y análisis de MTG en el pozo de agua termal en El Pedregoso.	49
24. Variación de la concentración promedio MTG en pozos geotérmicos en Calobre, Veraguas.	50
25. Ubicación de los sitios de muestreo en la provincia de Panamá .	53
26. Muestreo y análisis de MTG en la Terminal de Transporte de Albrook, a) estacionamiento b) parada de buses.. . . .	54
27. Variación de la concentración promedio de M T G en la Terminal de transporte de Albrook,	55
28. Muestreo y análisis de MTG en Campus de la Universidad de Panamá.	57
29. Muestreo y análisis en las cercanías de la Estación del Metro, San Miguelito.	57
30. Variación de la concentración promedio de MTG en la Terminal de transporte de Albrook, en San Miguelito y el Campus de la Universidad de Panamá.	59

31. Variación de la concentración del MTG con la velocidad del viento y la Temperatura el 19 de junio 2015, Estación del Metro, San Miguelito	61
---	----

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO	PÁGINA
1. Características del mercurio metálico	6
2. Características analíticas básicas del sistema RA-915+	26
3. Comparación de las concentraciones de MTG en aire de fuentes naturales reportadas a nivel internacional y en este estudio	51
4. Comparación de las concentraciones de MTG en aire de fuentes antropogénicas reportadas a nivel internacional y en este estudio	60

RESUMEN

Título: “Perfiles Ambientales de Mercurio Total Gaseoso en la Atmósfera de Zonas Urbanas y Fuentes Termales en Panamá, Utilizando la Espectrometría de Absorción Atómica Diferencial Zeeman”

Autor: Alma Nubia Espinosa López.

Facultad: Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología.

Escuela: Química.

Asesor: Prof. Juan Valdés González.

Año: 2018.

Se determinó la concentración de mercurio total gaseoso en aire (MTG), con un analizador automático de mercurio, utilizando la Espectrometría de Absorción Atómica Diferencial Zeeman, un límite de detección de $0,5 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$, en áreas de pozos termales de las provincias de Chiriquí (Volcán, Caldera y Tolé), Veraguas (El Potrero, Chitrá y El Pedregoso), Coclé (El Valle de Antón y en La Salineta), Los Santos (El Cortezo) y en la Ciudad de Panamá en tres (3) zonas urbanas, localizadas en San Miguelito, el Campus de la Universidad de Panamá y en la terminal de transporte de Albrook, se tomaron muestras continuas de aire en tiempo real cada 5 minutos. Se midió la velocidad y la dirección del viento, la temperatura y el porcentaje de humedad relativa. La concentración del MGT en la provincia de Panamá varió entre $0,5 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ a $2,91 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$; en la provincia de Veraguas las concentraciones variaron entre $0,5 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ a $57,3 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$; en la provincia de Coclé varió entre $0,5 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ a $3,6 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$; en Los Santos las concentraciones oscilaron entre $0,5 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ y $174,2 \text{ ng / m}^3 \text{ Hg}$ y en la provincia de Chiriquí entre $0,50 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ a $83,0 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ con un promedio de $4,52 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$. Las mayores concentraciones se obtuvieron durante las horas sol, cuando la temperatura alcanzó máximos y la humedad relativa fue baja. En las zonas cercanas a los pozos termales se obtuvieron las mayores concentraciones de MGT ($94,0 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$).

SUMMARY

The concentration of total mercury gas in air (TMG) was determined with an automatic mercury analyzer, using the Zeeman Differential Atomic Absorption Spectrometry, a detection limit of $0,5 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$, in areas of thermal wells of the provinces of Chiriqui (Volcan, Caldera and Tole), Veraguas (The Potrero, Chitra and The Pedregoso), Cocle (The Valley of Anton and in the Salineta), Los Santos (The Cortezo) and in Panama City in three (3) urban areas, located in San Miguelito, the Campus of the University of Panama and the Albrook transport terminal, continuous air samples were taken in real time every 5 minutes. Wind speed and direction, temperature and relative humidity percentage were measured. The concentration of MGT in the province of Panama varied between $0,5 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ to $2,91 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$; in the province of Veraguas, concentrations varied between $0,5 \text{ ng/m}^3$ to $57,3 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$; in the province of Cocle it varied between $0,5 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ to $3,6 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$; in Los Santos the concentrations ranged between $0,5 \text{ ng/m}^3$ and $174,2 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ and in the province of Chiriqui between $0,50 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ at $83,0 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ with an average of $4,52 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$. The highest concentrations were obtained during sun hours, when the temperature reached maximums and the relative humidity was low. In the areas near the thermal wells, the highest concentrations of MGT were obtained ($94,0 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$).

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El transporte atmosférico del mercurio gaseoso, es el mecanismo predominante, para su dispersión del mercurio hasta la superficie de la tierra (Steinnes, 2006; Castillo et al., 2011). Las fuentes naturales de liberación de mercurio incluyen a las emisiones volcánicas, la desgasificación del suelo y a la vía biológica, a través de los procesos de reducción que se llevan a cabo en los océanos. Mientras que las fuentes de emisiones antropogénicas son producto de las altas temperaturas que se desarrollan en la quema de los combustibles fósiles, donde las emisiones son generalmente una mezcla de mercurio elemental y sus productos de oxidación (Steinnes, 2006), la producción de cemento en la etapa de precalentamiento del horno y en la precalcación, la minería y otras actividades metalúrgicas, que comprenden la extracción y elaboración de materiales minerales vírgenes y reciclados, así como las emisiones provenientes del tratamiento de residuos, cremaciones, entre otros. En los residuos municipales se libera al ambiente, al quemar las pilas, las lámparas fluorescentes, termómetros, los residuos de pinturas y sus pigmentos. (Grigal, 2001).

Actualmente las fuentes antropogénicas son las que más mercurio liberan a la atmósfera, el agua y el suelo (Marsik et al. 2005). Las emisiones globales del mercurio se estiman en la actualidad en aproximadamente las 4.000 toneladas por año (Feng et al., 2001).

Del total de mercurio presente en la atmósfera, se estima un 98 % como mercurio metálico, el cual tiene un tiempo de permanencia de 1 año. Esto significa que el mercurio gaseoso emitido por una fuente, en un punto dado, es dispersado a través de la atmósfera a los hemisferios y contribuye a su posterior deposición en zonas muy remotas (Steinnes, 2006).

Este metal es tóxico para el ser humano a partir de ciertos niveles críticos, que dependen fundamentalmente de las relaciones dosis-efecto y dosis-respuesta. Asimismo, depende de las variaciones en la exposición, la absorción, la metabolización y la excreción (Poissant *et al.*, 2004). Estudios realizados a trabajadores expuestos a los vapores de mercurio elemental, han señalado disfunción del sistema nervioso central, insuficiencia renal, problemas respiratorios, incremento en los latidos del corazón y la presión sanguínea, taquicardia y problemas gastrointestinales, (NEDP, 2006; PNUMA, 2005).

Es muy poco lo que se conoce sobre la distribución geográfica del mercurio gaseoso en el territorio panameño, por lo que se implementó para su muestreo y análisis la espectrometría Diferencial Zeeman, con modulación de alta frecuencia de luz polarizada (ZAAS-HFM), utilizando el analizador de MGT RA-915 +, dispositivo sofisticado de alta precisión, diseñado para medir la concentración Total de mercurio gaseoso (MTG) en el aire, ya sea en ambiente interno o externo, tales como zonas residenciales, zonas de producción, ambiente laboral,

ductos que conducen gas natural o en chimeneas de todo tipo de industrias, incluyendo plantas termo-eléctricas e industrias del cemento.

El analizador es utilizado para la medición del MTG, tanto en puntos de muestreos estacionarios o en movimiento, desde vehículos (automóviles, barcos, helicópteros y aviones). También se utiliza para resolver problemas ambientales, asociados con la industria petrolera, minera y de fabricación, así como para vigilar y controlar procesos tecnológicos industriales, monitoreo de la actividad geotérmica y en la investigación científica y sanitaria.

Este estudio piloto presenta la distribución del mercurio total gaseoso en zonas rurales, urbanas y termales de la República de Panamá y su impacto potencial sobre la población. A largo plazo se conocerá su distribución en más de un centenar de zonas y su velocidad de transferencia hacia la población.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El mercurio es un metal de color plateado brillante que se encuentra en bajas concentraciones en la litosfera, la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera (Ebadian *et al.*, 2001). Las características físicas de este metal se presentan en el cuadro 1 (EPA, 1997).

Cuadro 1. Características físicas del mercurio metálico.

Característica	Mercurio
Fórmula	Hg ⁰
Número atómico	80
Masa Molecular (g/mol)	200,59
Estado físico (TPN)	Líquido plateado
Temperatura de ebullición (°C)	356,72
Temperatura de fusión (°C)	-38,87
Densidad (g/cm ³ a 25 °C)	13,534
Solubilidad en agua (µmol/L a 25 °C)	0,28
Presión de vapor (Pa a 20°C)	0,17

Fuente: Merck, 1989.

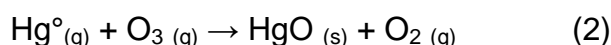
El mercurio forma compuestos inorgánicos con los halógenos, nitratos y sulfatos, el azufre y el oxígeno. Las sales de mercurio en su mayoría son cristales blancos, con excepción del sulfuro de mercurio II (conocido como Cinnabar), el cual es rojo y cambia su coloración a negro cuando está expuesto a la luz. El óxido de mercurio II es anaranjado rojizo (Ebadian *et al.*, 2001).

Cuando el mercurio se combina con átomos de carbono, forma compuestos organomercurados. Existe una gran variedad de este tipo de compuestos orgánicos, siendo el metilmercurio el más común en el ambiente (EBB *et al.*, 2005).

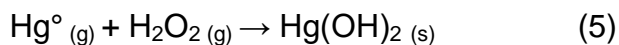
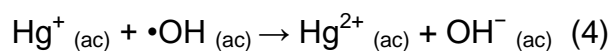
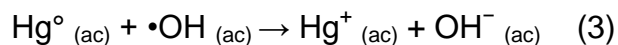
Las especies orgánicas e inorgánicas de este elemento, se deben en su mayoría a las reacciones que tienen lugar en la atmósfera, por medio de las cuales el mercurio metálico es oxidado a Hg^{1+} y Hg^{2+} (Roustan *et al.*, 2006, Siri, 2002). Una vez que los vapores de mercurio se encuentran en la atmósfera, se mezclan en la troposfera en concentraciones de 1 a 4 ng/m³. La mayoría de las reacciones que ocurren en esta capa de la atmósfera tienen lugar en la fase acuosa, como la niebla y las gotas de agua; por lo que el mercurio elemental se deposita en la superficie de las gotas, hasta que se establece una concentración en equilibrio, según la ley de Henry, ecuación (1) (Siri, 2002).



Esta condición de equilibrio permite que el mercurio sea más propenso a la oxidación. El mercurio elemental en presencia del ozono se oxida a óxido de mercurio (II), según la reacción (2) (European Commission Science, 2006).



Éste metal también reacciona en la atmósfera en presencia del radical hidroxilo, ($\bullet\text{OH}$) y del peróxido de hidrógeno, H_2O_2 , de acuerdo con las reacciones 3, 4 y 5 (Pehkonen, 1999) y (Siri, 2002).



2.1 Ciclo del mercurio

Las reacciones de oxidación – reducción, en las que participa el mercurio metálico en la atmósfera, producen gran variedad de formas orgánicas e inorgánicas, las cuales poseen una gran movilidad en los ciclos biogeoquímicos, como se muestra en la figura 1 (Clarkson, 2002).

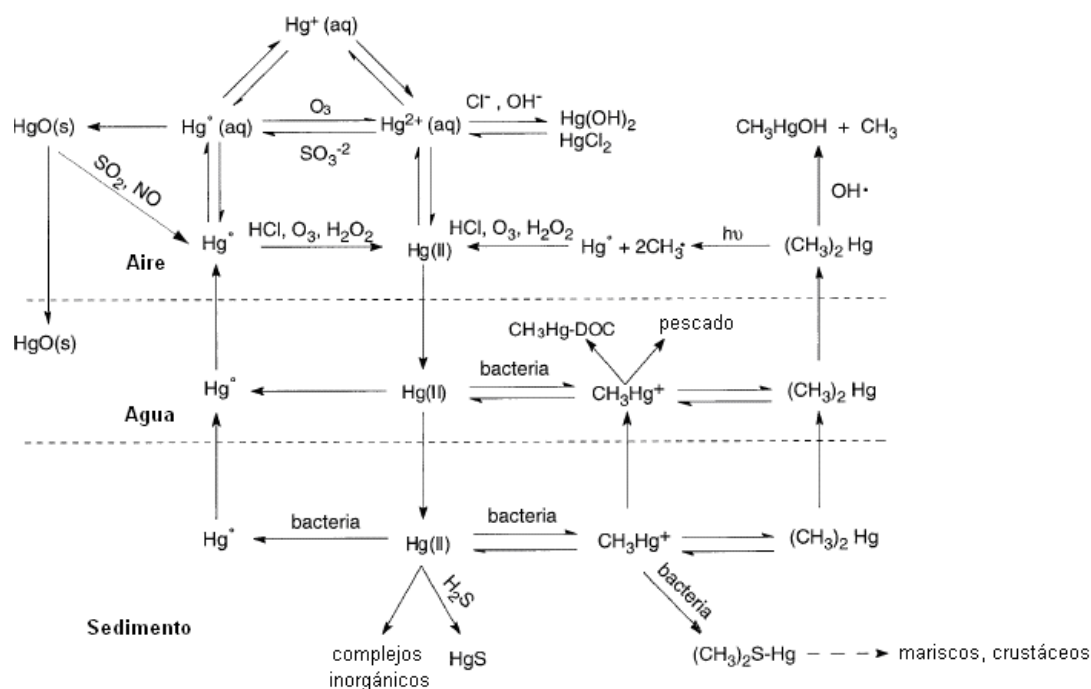


Fig. 1. Ciclo del mercurio en el ambiente. Fuente: ATSDR, 1999

La movilidad del mercurio en el ciclo biogeoquímico es facilitada por la deposición seca y la deposición húmeda (Krug *et al.*, 2004). De esta manera, la deposición del mercurio en los suelos se produce a partir del vapor de mercurio metálico y por la deposición del mercurio en forma iónica (Boszke *et al.*, 2003). Las especies de mercurio en forma de Hg^{2+} representan un factor de riesgo importante, porque en ese estado de oxidación, el mercurio es fácilmente metabolizado a compuestos orgánicos y se puede transformar en complejos solubles, que son absorbidos por las plantas (Leemarkers *et al.*, 2005).

La presencia del mercurio en las aguas naturales se debe al mercurio soluble en forma iónica y al mercurio que se encuentra formando compuestos

como el metilmercurio, o bien como mercurio en fase sólida, adsorbido sobre partículas arrastradas por el agua. De estas especies, las que presentan el mayor riesgo medioambiental y para la salud son las formas solubles (Segade *et al.*, 1999).

Una vez que el mercurio ha sido depositado, es incorporado a la cadena alimenticia, punto donde ocurre un incremento de las concentraciones de mercurio, como resultado de la bioacumulación y la biomagnificación (Steffen *et al.*, 2007).

Se considera que todas las especies de mercurio son bioacumulables en algún grado, siendo el metilmercurio la especie que presenta mayor bioacumulación (Poissant *et al.*, 2004). El principal problema que genera esta especie ocurre en el medio acuático, por la facilidad con que se incorpora a los seres vivos que viven en él. Los peces captan el metilmercurio a través de las agallas, pasando a su sistema circulatorio y lo acumulan en sus órganos y masa muscular. Es así como el mercurio se incorpora a la cadena trófica humana, principalmente a través de la pesca y el consumo de especies contaminadas (Congreso Nacional del Medio Ambiente, 2004).

2.2 Impacto del mercurio en la salud

De las especies de mercurio, el mercurio metálico es el que tiene una vida media más larga en la atmósfera, por lo que es importante analizar su toxicología.

Este metal es tóxico para el ser humano a partir de ciertos niveles críticos, que dependen fundamentalmente de las relaciones dosis-efecto y dosis-respuesta. Asimismo, depende de las variaciones en la exposición, la absorción, la metabolización y la excreción (Poissant *et al.*, 2004).

Estudios realizados a trabajadores expuestos a los vapores de mercurio elemental, han señalado un aumento en los siguientes síntomas:

- Disfunción del sistema nervioso central, a partir de niveles de exposición superiores a los $0,1 \text{ mg/m}^3$ (PNUMA, 2005).
- Insuficiencia renal debida a la acumulación de Hg^{2+} en los riñones, en concentraciones entre $0,1$ y $0,3 \text{ mg/m}^3$ (Clarkson, 2002).
- Problemas respiratorios, algunos síntomas son tos, contricción del pecho y dificultad para respirar. En algunos casos cuando han ocurrido exposiciones a altas concentraciones, se han observado edema pulmonar, fibrosis e incluso la muerte (ATSDR, 1999).
- Incremento en los latidos del corazón y la presión sanguínea. Estos también han sido detectados como consecuencia a la exposición de

vapores de mercurio en periodos mayores a 5 años y con exposiciones de aproximadamente 0,25 mg/m³. También se presentan casos de taquicardia como uno de los síntomas previos a la aparición de enfermedades cardiacas severas (Leermarkers *et al.*, 2005).

- Problemas gastrointestinales. Se asocian a la inhalación de estos vapores, la diarrea, el dolor de estómago, la salivación excesiva y el vómito (NEDP, 2006; PNUMA, 2005).

Los síntomas ya citados son las afecciones principales, causadas por la exposición crónica y aguda a los vapores de mercurio, tanto por exposición directa en los casos laborales, como por el contacto con los vapores de mercurio presentes en el ambiente.

2.3 Emisiones de mercurio

El mercurio puede ser emitido al ambiente por dos fuentes: las naturales y las antropogénicas.

2.3.1 Emisiones naturales

Existen muchas fuentes naturales emisoras de mercurio al ambiente, dentro de las principales se encuentran: los océanos, los volcanes, además, de los depósitos minerales de mercurio (IUPAC, 1998; Sirivarasai *et al.*, 2003).

Estudios realizados por Pirrone en el 2008, han estimado que a nivel mundial se emiten 5.220 t/a Hg, provenientes de las fuentes anteriormente citadas (Pirrone *et al.*, 2008).

Las capas bajas del suelo contienen bajas concentraciones de mercurio, que pueden difundirse continuamente a la superficie terrestre, debido a las altas temperaturas del manto terrestre (Ramos *et al.*, 2005). De esta manera las regiones que contienen concentraciones elevadas de mercurio en las rocas superficiales, se caracterizan por emitir grandes cantidades de mercurio a la atmósfera (Manahan, 1991).

En las zonas de fracturas geológicas profundas, los procesos de emisión de mercurio proveniente del suelo tienen una mayor intensidad. Allí se encuentran los llamados cinturones geoquímicos de mercurio, en cuya capa superior las concentraciones de ese metal exceden apreciablemente los valores medios. En algunas partes de esos cinturones, la gran acumulación de mercurio condujo a la formación de depósitos explotables (CYTED, 2001).

Los depósitos más importantes de mercurio se encuentran en la región del mediterráneo, en Almaden, España, Idrija, Eslovenia y Monte Amiata, Italia y presentan los mayores yacimientos de cinnabar. Esta especie de mercurio se encuentra en menores cantidades en zonas de Perú, California, México, China y Japón (Siri, 2002; Ramos *et al.*, 2005).

Como ya se mencionó anteriormente, una de las principales fuentes naturales de mercurio son los volcanes. Se ha obtenido evidencia directa de la descarga de este metal por actividad volcánica y fumarólica en zonas como Hawái, Islandia, y la Antártica. En Hawái se determinó que anualmente son emitidas 261 toneladas de mercurio por el Volcán Halemaumau (Siegel *et al.*, 1984).

En volcanes que no se encuentran en período eruptivo, se han realizado mediciones de los vapores de mercurio y se encontraron concentraciones altas. Por ejemplo, en 1980 se realizaron estudios en el Monte Santa Elena, Estados Unidos, antes que iniciara la actividad eruptiva, las concentraciones de mercurio en la columna de gases variaron entre 750 a 1.800 ng/m³ (Varekamp *et al.*, 1981).

En general, Pyle y colaboradores, basándose en datos obtenidos en los volcanes activos, consideran que la emisión volcánica mundial promedio de mercurio es de 700 t/a, lo que representa entre el 20 % y 40 % de las emisiones naturales totales. Se considera que el 75 % es emitido por erupciones esporádicas y no por las erupciones explosivas de grandes magnitudes (Pyle *et al.*, 2003).

Las emisiones de mercurio de los volcanes activos son de gran interés, ya que permiten vigilar y prever la actividad volcánica, así como estimar la

contribución de esta fuente natural a la atmósfera, sus efectos sobre el ambiente y la salud humana (Pirrone *et al.*, 2008).

2.3.2 Emisiones Antropogénicas

Se considera que anualmente en el mundo se emiten 2.436 t/a Hg (Pirrone *et al.*, 2008). Estas emisiones antropogénicas de mercurio son producidas por dos tipos de fuentes: las puntuales y las difusas. Las fuentes puntuales son asociadas con puntos geográficos establecidos y representan alrededor del 98 % de las emisiones antropogénicas del metal al ambiente (EPA, 1997).

Las fuentes puntuales se clasifican en dos grupos:

- Las fuentes de combustión, que llegan a producir hasta 1.200 toneladas métricas de mercurio por año, dentro de las cuales se encuentran las calderas, los incineradores de residuos municipales, los incineradores de residuos médicos y peligrosos. Además, el mercurio está presente como elemento traza en combustibles fósiles y diversos materiales de desecho (Olmez, 1997; UNEP Chemicals ,2002).
- Las fuentes de producción incluyen tanto procesos que requieren el uso de mercurio directamente, como aquellas en las que se genera el metal como un subproducto. Dentro de éstas se pueden citar principalmente, la industria cloro-alcalina, la producción de cemento, la producción de pasta de papel, además de la producción de instrumentos

y aparatos eléctricos como lámparas y circuitos (Pirrone *et al.*, 1996; Lacerda *et al.*, 2004).

Las fuentes difusas son aquellas que emiten los contaminantes de manera irregular difícilmente localizables. Su incidencia con respecto a las fuentes puntuales es mucho menor y son consideradas por la EPA como un 2,2% de las emisiones antropogénicas totales de mercurio (EPA, 1997). Ellas son normalmente muy pequeñas y numerosas (Olmez, 1997).

A nivel mundial las emisiones antropogénicas puntuales y difusas continúan en aumento, sobre todo por la rápida expansión de la economía. Diversos inventarios de emisiones realizados en las principales regiones industrializadas del mundo, indican que el continente asiático es el que más contribuye a las emisiones antropogénicas, aportando más del 50 % de las emisiones globales (Jaffe *et al.*, 2005).

2.4 Panamá: Situación actual

La evolución de la economía panameña en la década actual muestra un dinamismo mucho más marcado que el experimentado en la década de los noventa (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2010-2014). En este desempeño influyeron positivamente las actividades de transporte, minas y canteras, construcción, agricultura y comercio entre otras. En Panamá el éxodo

de la población rural hacia las urbes, así como la creciente urbanización han provocado complejos problemas, para establecer los servicios básicos que demanda la población, lo que se traduce en desmejoras del ambiente, cuya solución resulta difícil y costosa (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2010-2014). A raíz de esto también se ha incrementado la contaminación del aire, disminuyendo su calidad (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2010-2014).

2.5 Técnicas de análisis de mercurio en aire

Para la determinación de mercurio elemental en aire se han desarrollado técnicas para su muestreo y análisis. Las técnicas de análisis más utilizadas son las espectrometrías de fluorescencia atómica por vapor frío, de emisión atómica con inducción de plasma acoplado y la absorción diferencial Zeeman (EPA, 1994; IUPAC, 1998; EPA, 1999; HSL, 2002).

2.5.1 Espectrometría de Fluorescencia Atómica por Vapor Frío (CVAFS)

La Espectrometría de Fluorescencia Atómica por Vapor Frío (CVAFS) es uno de los métodos más utilizados, para la determinación de mercurio en diferentes tipos de matrices, tanto biológicas como ambientales (Koirtyohann *et al.*, 1976).

El mercurio, al poseer una elevada presión de vapor, es el único de los metales que puede ser introducido fácilmente al espectrómetro en fase gaseosa y ser analizado sin dificultad (Gan *et al.*, 2004; Sommar *et al.*, 1999).

Los átomos de mercurio en estado gaseoso se excitan por medio de una lámpara de vapor de mercurio a 253,7 nm. Los átomos excitados reemiten una radiación de fluorescencia que permite cuantificar el mercurio presente con un detector de fotones, colocado a 90° con relación al haz de excitación (Sommar *et al.*, 1999). Además, el mercurio posee la característica de que la longitud de onda a la cual absorbe es la misma longitud de emisión, permitiendo que su análisis y su detección sean rápidos y no se presenten errores en el proceso (Marins *et al.*, 2002; Sommar *et al.*, 1999).

Para la determinación de mercurio elemental se han utilizado diversos equipos de muestreo, que se basan en la adsorción de mercurio sobre cartuchos rellenos con carbón activado, Hopcalita®, Cerulita®, oro y plata, así como con lana de cuarzo cubierta de oro (Cursino *et al.*, 2003; Anderson *et al.*, 1971; Lodge *et al.*, 1990; Long *et al.*, 1993).

La determinación del mercurio absorbido en Hopcalita ® y la Cerulita®, se realiza digiriendo en ácido y se analiza por los métodos de vapor frío o por el método de generación de hidruro, respectivamente (Cursino *et al.*, 2003). Las muestras recolectadas sobre superficies de oro, plata y carbón activado, se

desorben térmicamente del cartucho y son transportadas por un gas de arrastre hacia el Espectrofotómetro de Fluorescencia Atómica por Vapor Frío, donde son analizadas (Koirtyohann *et al.*, 1976; IUPAC, 1998).

2.5.2 Espectrometría de absorción atómica diferencial Zeeman

El efecto Zeeman, descubierto por el físico holandés Pieter Zeeman, es descrito como la separación de una línea espectral (radiación monocromática) en múltiples componentes, cuando la radiación es colocada en un campo magnético permanente. En el caso del mercurio, la línea de mercurio de 253,7 nm es dividida en tres componentes polarizados Zeeman (π , σ_- , σ_+). Cuando la radiación se propaga a lo largo de la dirección del campo magnético, un fotodetector detecta solamente la radiación del componente σ_- y uno de estos cae dentro de la línea de absorción y el otro pasa de lado, de tal forma, que cuando el vapor de mercurio no está presente en la celda analítica, la intensidad de la radiación de ambos componentes σ_- , son iguales y cuando los átomos de mercurio aparecen en la celda analítica, la diferencia entre las intensidades de los componentes σ_- aumenta conforme aumentan las concentraciones de los vapores del mercurio. Los componentes σ son separadas temporalmente por el modulador de polarización y los componentes interferentes no afectan las lecturas del analizador, ya que el desplazamiento espectral de las componentes σ es significativamente más pequeño, en comparación con los anchos de las bandas de absorción molecular y del espectro de dispersión que presenta la absorción de

fondo de estos compuestos. Cuando la concentración de mercurio en la muestra analizada es muy baja, la sensibilidad del análisis se mejora utilizando una celda multipaso con una longitud efectiva de 10 m aproximadamente. De esta forma, se logra aumentar el porcentaje de átomos de mercurio que absorben la radiación σ_- en la celda analítica (Lumex. Mercury analyzer RA-915+. Users manual. 4-8 pp., Fig. 2).

El funcionamiento del analizador RA-915 + se basa en la espectrometría de absorción atómica diferencial de Zeeman utilizando la modulación de alta frecuencia de luz polarizada (ZAAS-HFM).

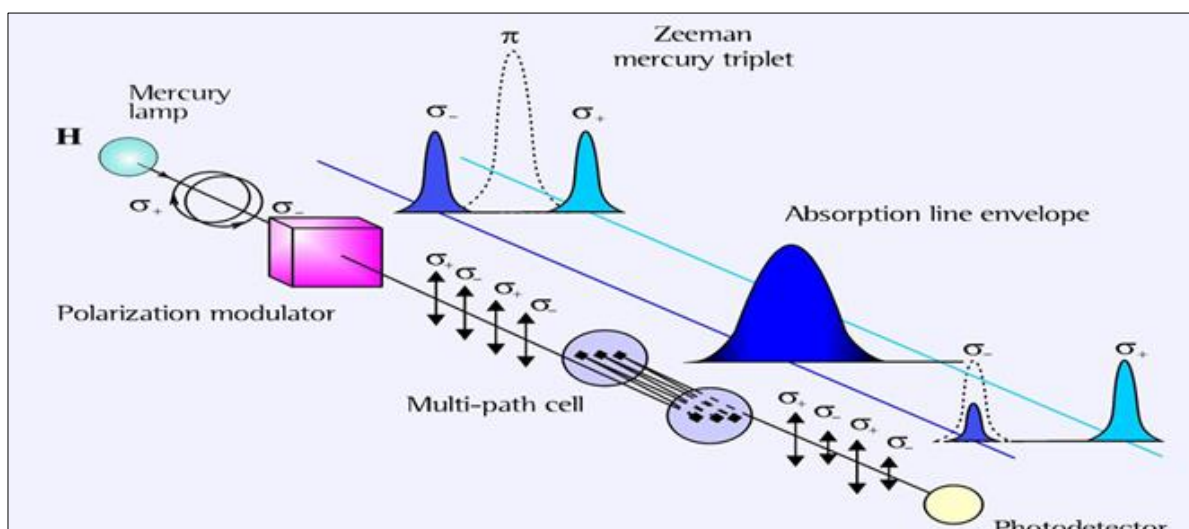


Fig. 2. Principio físico de operación del analizador RA-915+. Tomado de: (Lumex®) Mercury Analyser RA-915+. User's Manual. p.p. 6

CAPÍTULO III

ASPECTOS METODOLÓGICOS

3.1 Instrumentación

La instrumentación utilizada en este estudio consiste fundamentalmente de un analizador automático del mercurio total gaseoso, MTG, presente en el aire bajo estudio, una computadora portátil y una estación meteorológica portátil, cuyos componentes son los siguientes:

3.1.1 Analizador de vapor de mercurio RA-915+

El analizador RA-915+ está compuesto de los siguientes componentes:

- 1) Lámpara de mercurio EDL
- 2) Generador de alta frecuencia
- 3) Modulador de polarización
- 4) Unidad de control del modulador
- 5) Celda de múltiples caminos
- 6) Fotodetector
- 7) Unidad de procesamiento de la señal electrónica
- 8) Microprocesador incorporado
- 9) Pantalla y unidad de control
- 10) Unidad de conmutación de flujo de gas
- 11) Filtro de absorción
- 12) Bomba de aire de la celda de múltiples caminos
- 13) Celda de una sola ruta o celda externa (es parte del accesorio RP-91C)
- 14) Bomba de membrana

El analizador se controla de la siguiente manera:

- Desde la unidad de visualización y control montada en la unidad base del analizador.
- Desde la pantalla y la unidad de control conectadas con la unidad base a través de un cable de señal.
- Por medio de una computadora compatible con IBM, conectada con la unidad base a través del cable de interface.

El analizador de mercurio RA-915 + es un dispositivo de alta precisión, con ventanas ópticas calentadas y dos cámaras de medición, lo cual proporciona una determinación directa única del mercurio y permite el análisis directo de muestras de matriz compleja de sólidos y líquidos (no hay procedimientos de pretratamiento requerido). Todos los productos son transportados desde la primera cámara a la segunda por el gas de arrastre (aire). La segunda cámara se calienta continuamente a 800 °C, donde todos los compuestos de mercurio y los compuestos orgánicos se descomponen en dióxido de carbono y agua. El corrector Zeeman del espectrómetro elimina la absorción residual de fondo. (Users manual 4-8 pp.)

El analizador de mercurio posee un catalizador, el cual mejora la eficiencia de la oxidación y la disociación en la segunda cámara y posee una unidad de fuente de alimentación, que mantiene estable la velocidad de entrada de los gases al sistema de detección y proporciona el flujo de aire y la temperatura adecuada a las cámaras y a la celda de análisis.

El RA-915 + está diseñado para medir la concentración de vapor de mercurio en el aire, ya sea en el ambiente externo en zonas residenciales, zonas de producción, ambiente interno de trabajo, en ductos que conducen gas natural o en chimeneas de industrias, conectadas a sistemas productores de energía o a procesos de producción, tales como cementeras.

El funcionamiento del equipo se verificó, en el Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica de Panamá, Tocumen, Pabellón B, (Via Tocumen), siguiendo las instrucciones del fabricante, asegurando que contenía todo lo indicado por el fabricante y que respondía a todos los comandos indicados en el manual de operación. Posteriormente se armó completamente, según lo indicado en el manual de uso Lumex Mercury analyzer RA-915+, se puso en operación y se realizaron mediciones en los laboratorios del Centro de Investigación de la Universidad Tecnológica de Panamá, ubicado en Tocumen y sus alrededores.

El equipo incluye los siguientes elementos:

- Unidad base

- Display y unidad de control

- Fuente de alimentación (para el funcionamiento con una red de Corriente Alterna)

- Manual de instrucciones

- Kit de piezas de recambio y accesorios

(Filtros de absorción y polvo)

Bolso para transportar el equipo en el hombro

Pantalla de unidad de conexión por cable

Manguera de aire de admisión con prefiltro

Analizador de 9-PC Cable de interfaz (RS-232 estándar)

Software para la AR-915 +



Fig. 3. Analizador de vapor de mercurio RA-915+. Equipo ensamblado (Ohio Lumex).

Las características analíticas básicas del sistema se presentan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Características básicas del Analizador de vapor de mercurio RA-915+

Matrices	Límite de detección	Tamaño de la muestra	Técnica de atomización	Muestras analizadas por hora
Aire Ambiental*	0,5 ng/m ³	20 L/min	Sin atomización	Análisis en tiempo real
Agua	0,5 ng/L	20 mL	Vapor frío	15
Gas natural y otros gases	100 – 500 ng/m ³	5 – 20 L/min	Sin atomización	Análisis en tiempo real
Suelo y sedimentos	1 µg/kg	200 mg	Pirólisis	15
Orina	5 ng/L	1 mL	Vapor frío	15
Sangre	0,5 µg/L	0,2 mL	Vapor frío	15
Plantas	2 µg/kg	50 mg	Pirólisis	15
Pescado	2 – 10 µg/kg	5 – 50 mg	Pirólisis	15

*Límite de detección = 0,5 ng/m³ con un tiempo de respuesta de 10 segundos.

Datos técnicos y especificaciones principales

Batería incorporada 6,3 V

Fuente de corriente directa externa 10 – 14 V

Fuente de alimentación A.C., a través de la unidad externa 220/110 V,
50/60 Hz

El consumo de energía 20 W

Dimensiones (mm) 460 x 210 x 110

Masa (kg) 7,5

Condiciones de operación

Temperatura ambiente de 1 a 40 °C

Presión atmosférica 84 – 106,7 kPa

Humedad relativa debajo del 98 %, a 35 °C

3.1.2 Estación meteorológica Davis Vantage PRO 2

Los datos meteorológicos se obtuvieron con una estación meteorológica marca Davis Vantage PRO 2, (Fig. 4), equipada con un sensor de temperatura y una incertidumbre de $\pm 0,1$ °C, el cual opera entre los 0 °C y 60 °C. Tiene un sensor para humedad relativa, que posee una incertidumbre de ± 3 %, y mide el porcentaje de humedad relativa entre el 1 % y el 100 %.

La velocidad del viento se midió con un anemómetro de cazoletas grandes, con una exactitud de $\pm 0,4$ m/s. La dirección del viento se determinó con una veleta y los datos fueron almacenados en la memoria de la estación meteorológica.



Fig. 4 Estación meteorológica Davis Vantage PRO 2

3.2. Ubicación de los sitios de muestreo

Los sitios de muestreo se escogieron tomando como base la ubicación geográfica, la accesibilidad por carretera, seguridad y energía eléctrica. Estos se ubicaron utilizando un GPS Etex 10 en las provincias de Panamá, Veraguas, Coclé, Los Santos y Chiriquí, donde se evidenciaba contaminación antropogénica, áreas volcánicas y áreas de pozos termales como fuente natural de contaminación. Se realizaron 13 jornadas de muestreo: Panamá (4), Veraguas (3), Coclé (2), Los Santos (1) y Chiriquí (3).

3.3 Muestreo y análisis de las muestras

La muestra de aire fue introducida automáticamente al analizador de mercurio total gaseoso RA-915+, por medio de una bomba interna a una velocidad de 20 L/min y analizada con un Analizador de Vapor de Mercurio, con capacidad de medir MercurioTotal Gaseoso, MTG.

3.4 Tratamiento estadístico de los datos

El tratamiento de los datos se realizó utilizando el programa Lumex Datalogger, incorporado al RA-915+. Éste tiene la capacidad de recolectar los datos obtenidos y expresarlos en ng/m^3 de Hg, los cuales son almacenadas en hojas de texto y posteriormente, utilizando Microsoft Excel, se les dio formato de número. Una vez que los datos tenían formato de número, estos se tabularon y se procesaron, se realizaron interpolaciones lineales, en las que se obtuvieron los promedios horarios de las concentraciones diarias de mercurio. Con las emisiones horarias, se realizaron gráficos diarios de las concentraciones obtenidas en Microsoft Excel. Además, se confeccionaron figuras, tomando como base los datos meteorológicos y las variaciones de las concentraciones de mercurio diarias en cada punto de muestreo.

Una vez que se contó con los datos promedio horarios de la concentración de mercurio y los promedios horarios de los datos meteorológicos, se procedió a

relacionar las concentraciones de mercurio con la dirección del viento. Estas comparaciones se realizaron utilizando gráficos de dispersión. También se realizaron comparaciones del efecto de la temperatura y del porcentaje de humedad relativa con los promedios horarios de mercurio.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ubicaron trece (13) sitios de muestreo en cinco (5) provincias de la República de Panamá y se realizaron siete jornadas de muestreo. A continuación se presentan por provincia los sitios muestreados por campañas y los resultados obtenidos.

4.1 Provincia de Chiriquí

En la provincia de Chiriquí se establecieron tres (3) sitios de muestreo en pozos termales, donde se midió la concentración de MTG en cuatro (4) puntos ubicados en Cotito, Volcán distrito de Bugaba a $8^{\circ}51'59,45''$ N y $82^{\circ}43'39,45''$ O; en Caldera, distrito de Boquete a $8^{\circ}39'53,43''$ N y $82^{\circ}20'58,59''$ O se midió en un (1) punto y en Agua de Salud, distrito de Tolé a $8^{\circ}14'18,06''$ N y $81^{\circ}39'54,95''$ O se midió en cinco (5) puntos. Tal y como se muestra en la figura 5. Los sitios de muestreo en esta provincia se encuentran distantes. La primera campaña de muestreo se realizó del 10 al 12 de abril del 2013.

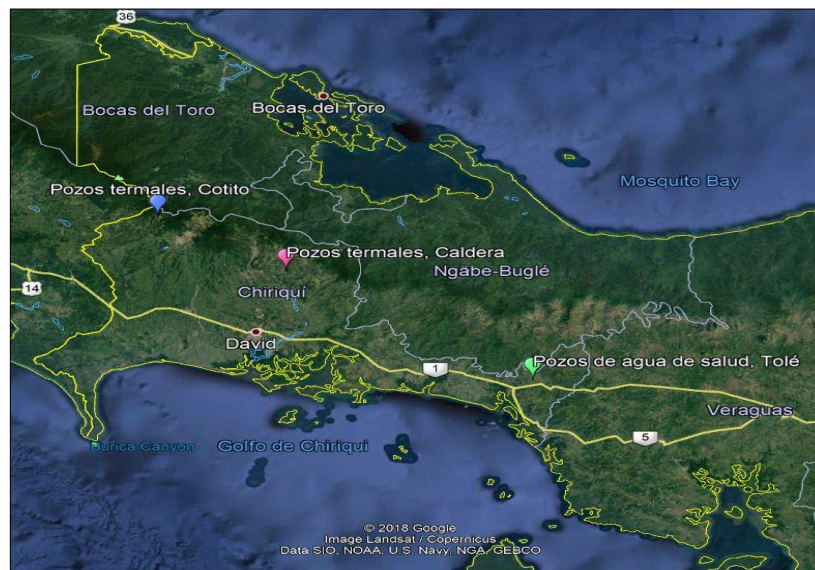


Fig. 5. Ubicación de los sitios de muestreo en la provincia de Chiriquí.
4.1.1 Pozos de aguas termales de Cotito

El punto de muestreo en Cotito consta de cuatro pozos termales, los cuales se ubican en una zona boscosa montañosa, a 5 km de la frontera con Costa Rica. Tres (3) pozos se encuentran a orillas de la quebrada Santa Clara, y presentaban un sedimento color naranja y una temperatura de 50 °C; el cuarto pozo emitía olores a compuestos azufrados y está ubicado a 100 m de la quebrada Santa Clara.



Fig. 6. Muestreo y análisis de MTG en los pozos termales de Cotito.

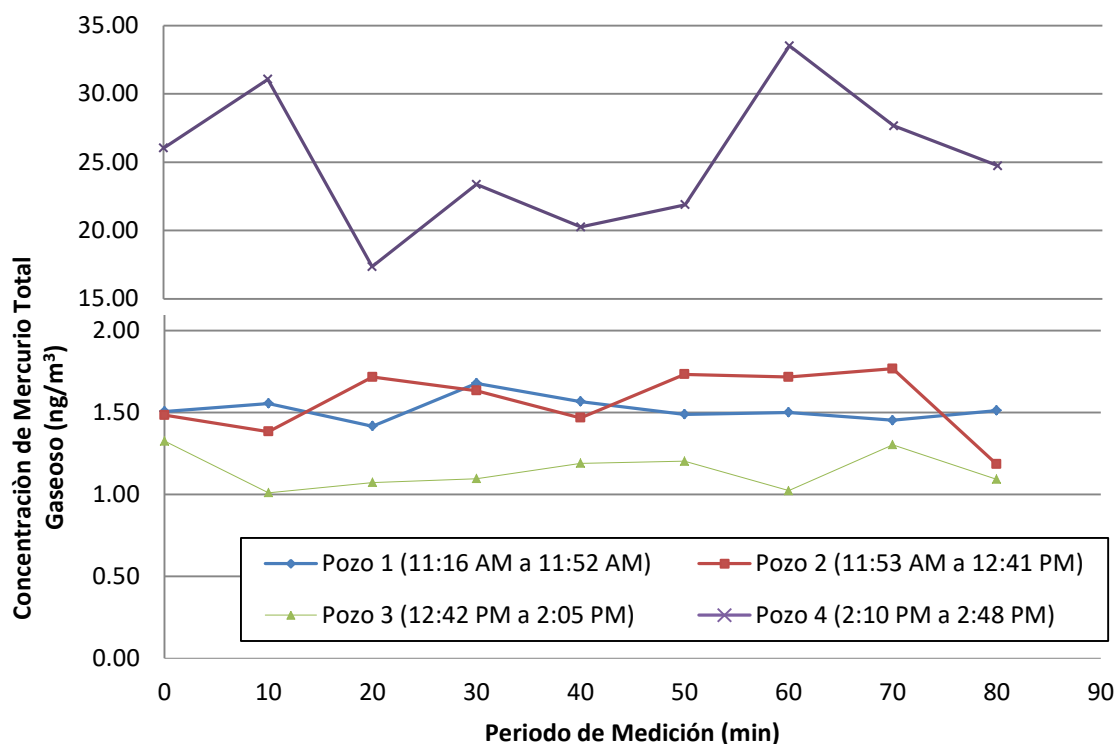


Fig. 7. Variación de la concentración promedio del MTG en Cotito, Pozo 1, 2, 3 y 4.

Las mediciones de MTG en los pozos termales 1, 2, 3 y 4 se realizaron el 10 de abril de 2013. Los resultados se presentan en la figura 7, en donde se observa que las concentraciones promedio de mercurio variaron de 1,32 ng/m³ a 33,5 ng/m³ Hg. En los pozos 1, 2 y 3 se obtuvieron concentraciones entre 1,32 ng/m³ Hg y 1,64 ng/m³ Hg con un promedio de 1,48 ng/m³ Hg, mientras que en el pozo 4 se encontraron concentraciones promedio de 49,0 ng/m³ Hg, una concentración mínima de 14,96 ng/m³ Hg y una máxima de 83,0 ng/m³ Hg.

4.1.2 Pozos de aguas termales de Caldera

Los pozos de aguas termales de Caldera se encuentran dentro de una propiedad privada, aproximadamente a unos 2,5 kilómetros de la calle principal. Ubicados cerca del pueblo de Caldera, están localizados en una zona boscosa cerca de la orilla del río Chiriquí.



Fig. 8. Muestreo y análisis de MTG en el pozo de aguas termales de Caldera.

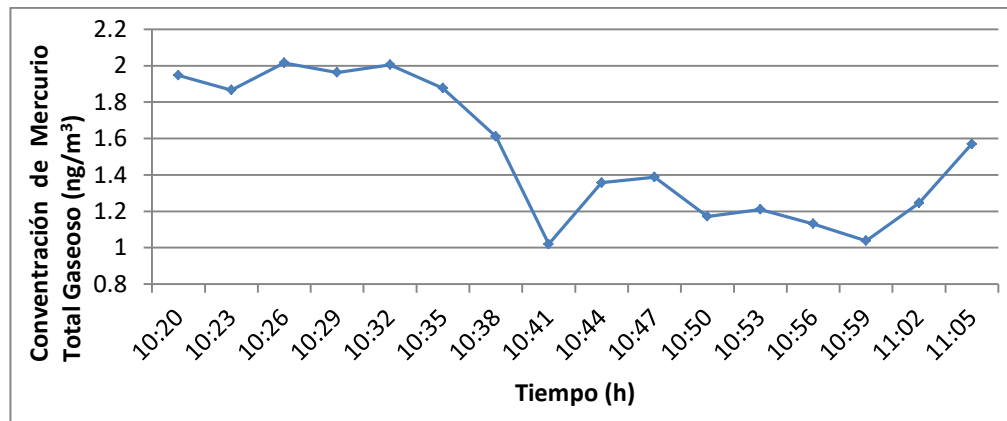


Fig. 9. Variación horaria de la concentración promedio del MTG en las aguas termales de Caldera el 11 de abril de 2013.

Como se observa en la figura 9, las concentraciones de mercurio en el área de los pozos termales de Caldera presentaron un mínimo de $1,0 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ y un máximo de $2,0 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ y un promedio de $1,5 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$.

4.1.3 Pozos de Agua de Salud, Tolé

Los pozos de Agua de Salud de Tolé no son termales, están conformados por cinco pozos, muy cerca uno del otro, a distancias de 50 cm a 60 cm. Están cercados con piedras a un lado de la granja Jesús Obrero. Los residentes del pueblo aseguran que el agua de los pozos es milagrosa por curar enfermedades. El muestreo se llevó a cabo el 13 de abril de 2013 durante 45 minutos alrededor de cada uno de los pozos.



Fig. 10. Muestreo y análisis de MTG en los pozos de Agua Potable de Salud, Tolé.

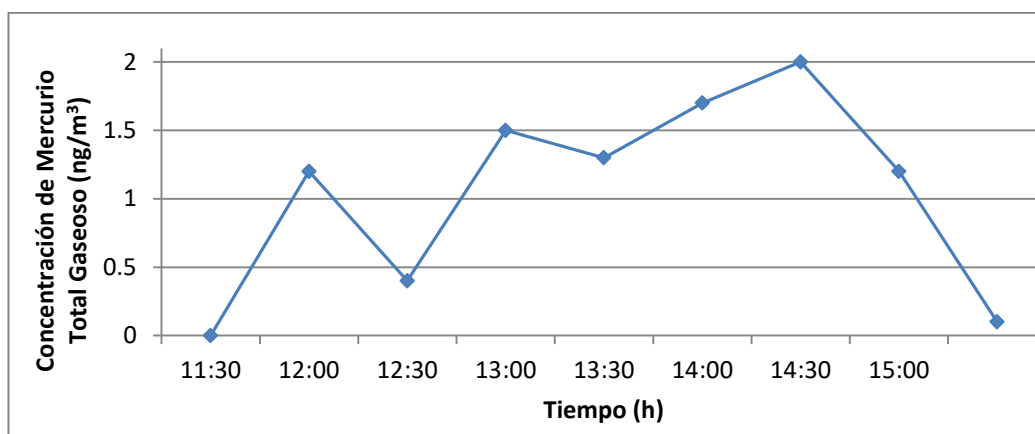


Fig. 11. Variación horaria de la concentración promedio del MTG en los pozos de Agua Potable de Salud, Tolé.

La figura 11 muestra las concentraciones promedio de MTG en donde se observa un mínimo de $0,5 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$, un máximo de $2,0 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ y un promedio de $1,2 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$.

4.2 Provincia de Coclé

La segunda campaña de muestreo se llevó a cabo del 15 al 17 de mayo de 2013 en la provincia de Coclé, se establecieron dos (2) sitios de muestreo (Fig. 12). El primero, específicamente en el Valle de Antón, en donde se ubicaron cinco (5) pozos termales a $8^{\circ}35'52,28'' \text{ N}$ y $80^{\circ}08'15,84'' \text{ O}$ (Fig. 13). El segundo sitio se ubicó en los pozos de agua salada de La Salineta de Olá en un (1) pozo, con las coordenadas geográficas a $8^{\circ}27'17,85'' \text{ N}$ y $80^{\circ}34'36,83'' \text{ O}$ (Fig. 15).

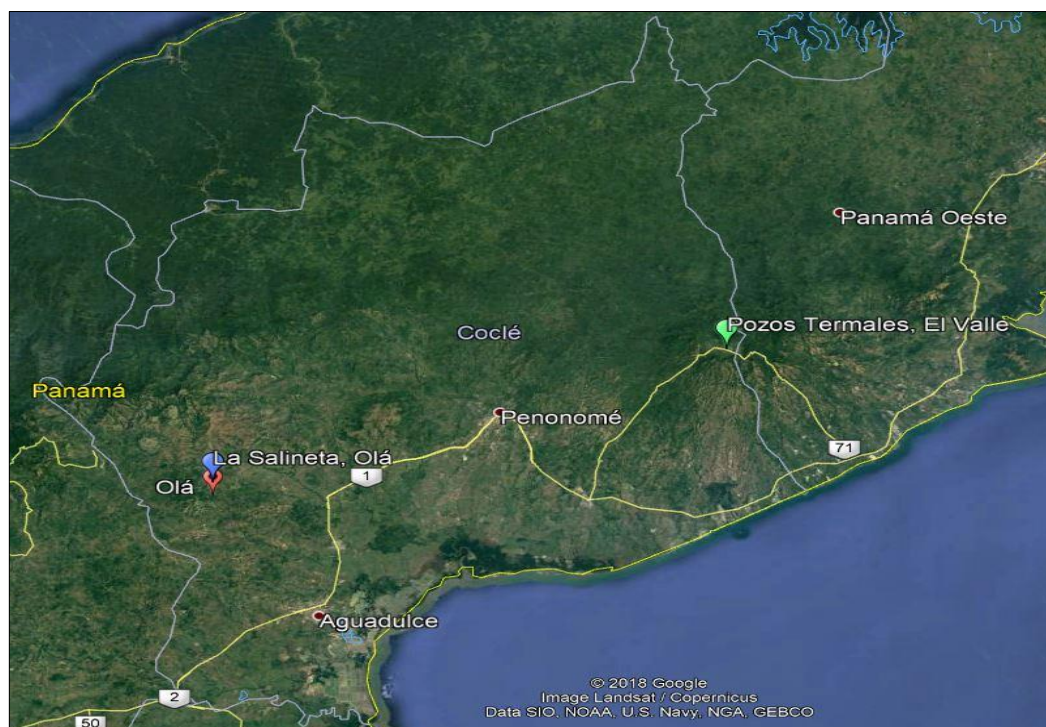


Fig. 12. Ubicación de los sitios de muestreo en la provincia de Coclé.

4.2.1. Pozos de aguas termales de El Valle de Antón

Los pozos termales de El Valle de Antón se encuentran dentro de un sitio público turístico con cinco pozos de diferentes tamaños, a distancias promedios que variaban entre 3 m a 5 m. La temperatura del agua varió entre 34 °C a 38 °C, con un promedio de 36 °C. Debido a la cercanía entre los pozos se midió la concentración de MTG en las áreas adyacentes. Se midió durante un periodo de seis horas consecutivas.



Fig. 13. Muestreo y análisis de MTG en los Pozos termales de El Valle de Antón.

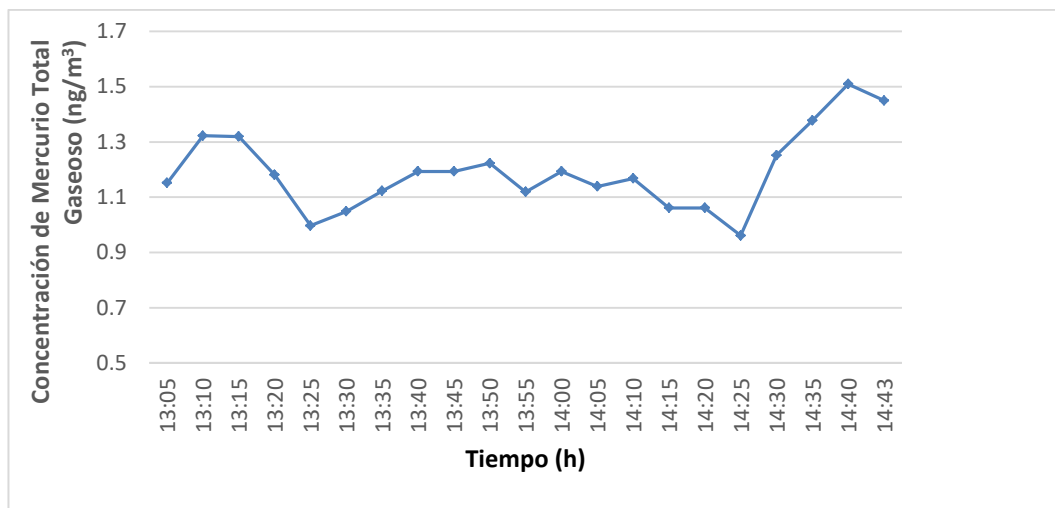


Fig. 14. Variación de la concentración promedio del MTG en El Valle de Antón.

Como se observa en la figura 14, las concentraciones de mercurio en el área de los pozos termales, el 15 de mayo de 2013, presentaron un mínimo de $0,96 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$, un máximo de $1,5 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ y un promedio de $1,2 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$. Las concentraciones más altas se encontraron en horas de la tarde y oscilaron entre $1,25 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ y $1,5 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$.

4.2.2 Pozo de agua salada en La Salineta, Olá

El pozo de agua se encuentra en el pueblo de La Salineta, el cual lleva ese nombre, debido a que el agua es salada. Está en una zona poblada de arbustos y no posee árboles ni cultivos. La temperatura promedio del agua fue de $33 \text{ }^\circ\text{C}$, el pozo emitía gases y tenía un sedimento de color naranja, tal y como se muestra en la figura 15.

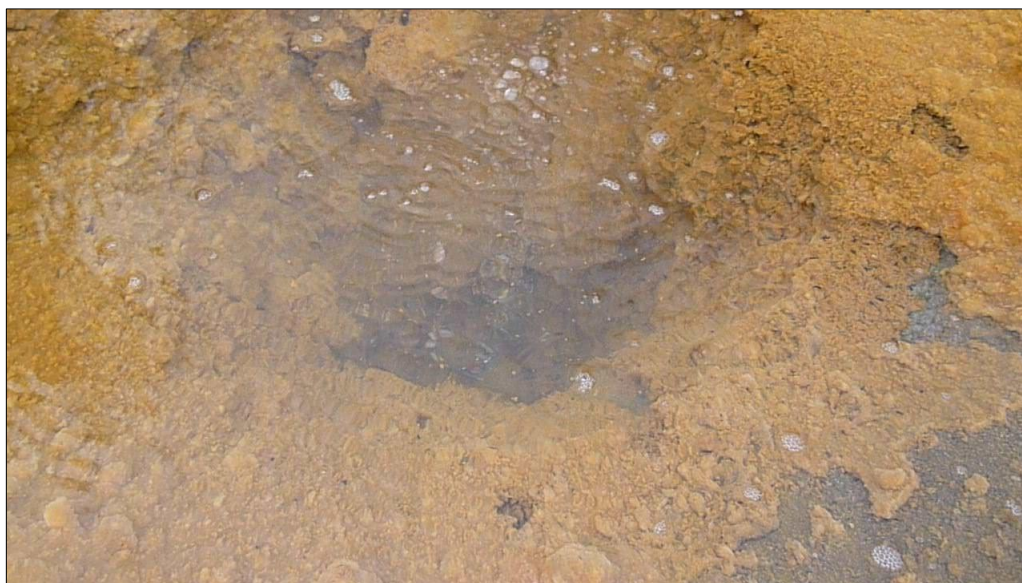


Fig. 15. Muestreo y análisis de MTG en el pozo de agua salada, La Salineta.

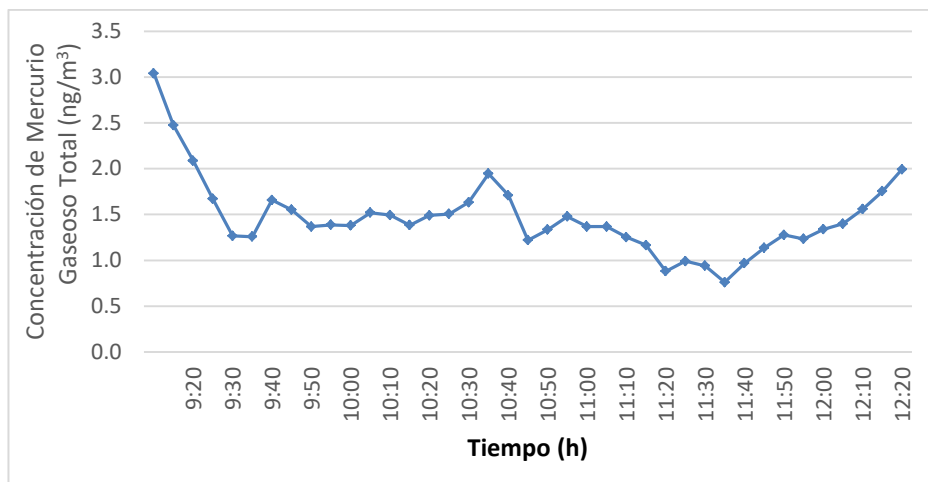


Fig. 16. Variación de la concentración promedio del MTG en La Salineta el 17 de mayo de 2013.

En la figura 16 se muestran las concentraciones de MTG en La Salineta, y muestran un mínimo de $0,8 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$, un máximo de $3,0 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ y un promedio de $1,8 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$. Además se observó que las concentraciones de MTG se mantuvieron constantes a partir de las 9:25 h hasta las 12:00 h.

4.3 Provincia de Los Santos

4.3.1 Pozo termal El Cortezo

La tercera campaña de muestreo tuvo lugar en el pozo termal El Cortezo el 14 de junio de 2013 (Fig. 17). Este pozo se encuentra en el parque nacional La Tronosa, ubicado en la sierra de Azuero, principalmente en el cerro La Tronosa, Tonosí. El parque nacional cuenta con un bosque tropical húmedo con las coordenadas geográficas a $7^{\circ}27'20,66'' \text{ N}$ y $80^{\circ}36'23,70'' \text{ O}$ (figura 18). La temperatura del agua en el pozo fue de 46°C .

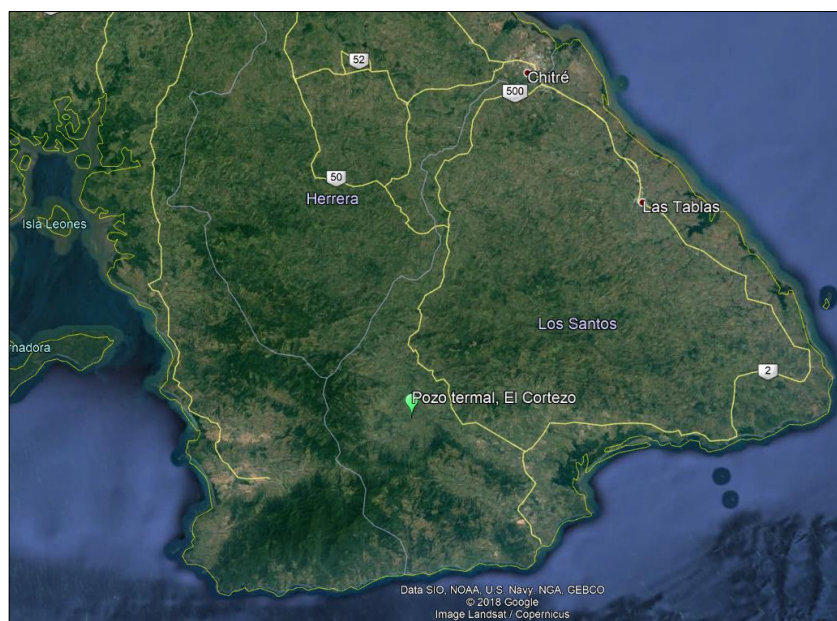


Fig. 17. Ubicación del sitio de muestreo El Cortezo, Los Santos.



Fig. 18. Muestreo y análisis de MTG en el pozo de agua termal El Cortezo.

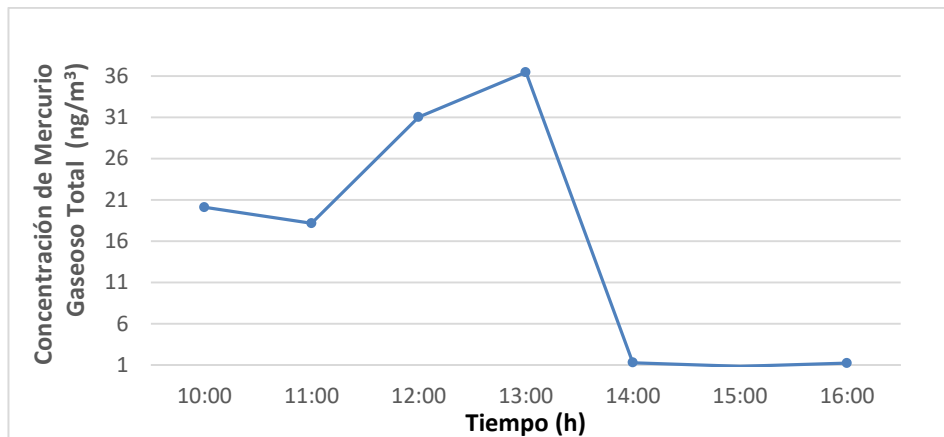


Fig.19. Variación de la concentración promedio del MTG en El Cortezo, Los Santos el 14 de Junio de 2014.

En la figura 19 se observa que la concentración promedio del MTG en los pozos termales del Cortezo fue de $18,5 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$, un mínimo de $1,0 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ y un máximo de $36,0 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$. Además también se observa que de las 10:00 h hasta las 13:00 h la concentración del MTG aumentó de $17,7 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ a $36,0 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$, para después disminuir a $1,0 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$.

4.4 Provincia de Veraguas

La cuarta campaña se realizó en el distrito de Calobre entre el 27 y el 29 de noviembre de 2013. Se establecieron tres (3) sitios de muestreo en pozos termales, empezando el 27 de noviembre en El Potrero a $8^{\circ}24'11,03'' \text{ N}$ y $80^{\circ}48'16,54'' \text{ O}$, posteriormente el 28 de noviembre en Chitrá a $8^{\circ}30'46,08'' \text{ N}$ y $80^{\circ}53'50,27'' \text{ O}$ y finalmente el 29 de noviembre de 2013 en El Pedregoso a $8^{\circ}24'54,82'' \text{ N}$ y $80^{\circ}51'58,82'' \text{ O}$.

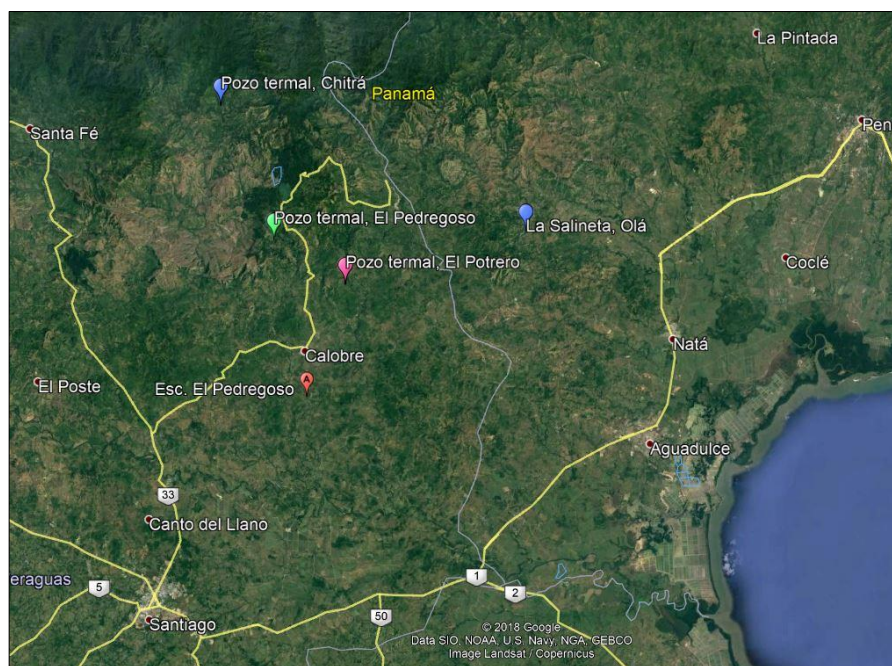


Fig. 20. Ubicación de los sitios de muestreo en la provincia de Veraguas, Calobre.

En el distrito de Calobre se encuentran por lo menos diez (10) pozos termales, de los cuales se estudiaron cinco (5) de ellos, dos (2) en El Potrero (Fig. 21), dos (2) en Chitrá (Fig. 22) y uno (1) en El Pedregoso (Fig. 23). Los pozos termales de El potrero se ubican en un área boscosa y colindan con el río Aguacatal. Los dos pozos se encuentran a distancias muy cortas (2 m), el primer pozo se caracteriza por tener forma circular cementada y el segundo forma natural. Las temperaturas fueron de 37 °C y de 52 °C, respectivamente mientras que la del río fue de 23 °C. Los pozos termales de Chitrá también se encuentran en una zona montañosa, situada a la orilla del río Gatu, alrededor del cual se observa un sedimento color naranja (Fig. 22). La temperatura del agua del pozo y del río fue de 40 °C y 22 °C, respectivamente. El pozo termal de El Pedregoso

se localiza a 10 m de la orilla del río San Juan, en una zona montañosa, la temperatura del agua del pozo fue de 40 °C (Fig. 23).

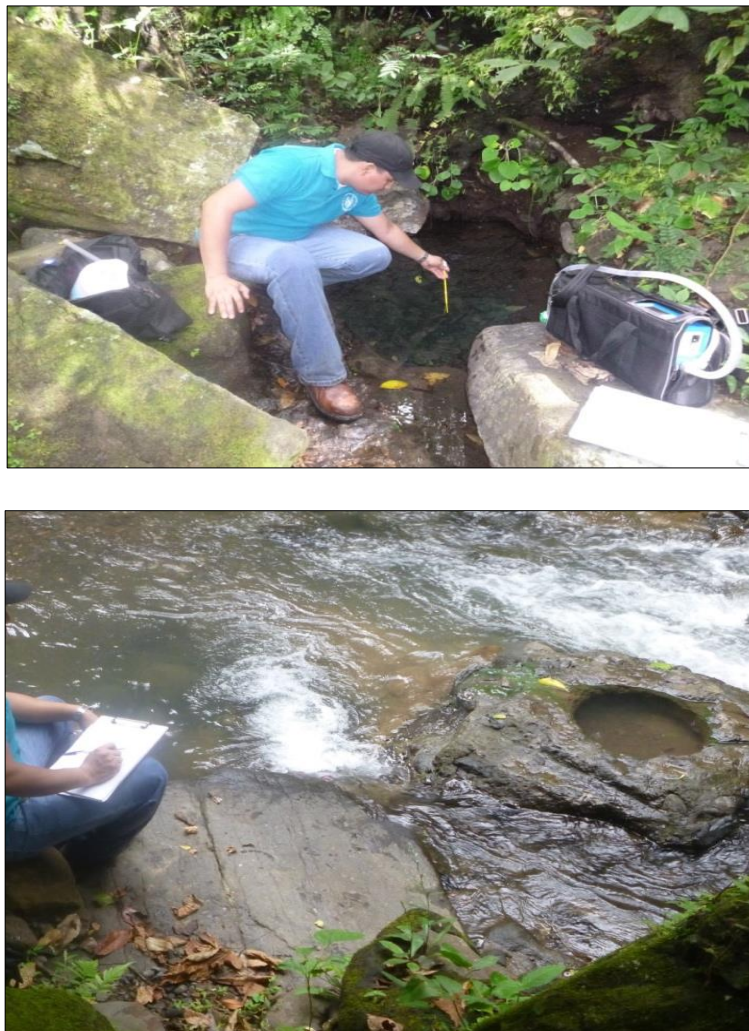


Fig. 21. Muestreo y análisis de MTG en los pozos de aguas termales El Potrero.



Fig. 22. Muestreo y análisis de MTG en el pozo de agua termal en Chitrá.



Fig. 23. Muestreo y análisis de MTG en el pozo de agua termal en El Pedregoso

Los resultados de las mediciones realizadas en los pozos termales de Calobre se muestran en la figura 24. Y se observa que en El Potrero las concentraciones promedio de MTG variaron de $0,9 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ a $5,0 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$, con un promedio de $3,0 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$.

En El Pedregoso las concentraciones promedio de mercurio variaron de $0,9 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ a $37,4 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ con un promedio de $19,1 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$.

En el pozo 1, Chitrá, la concentración promedio de MTG, fue de $1,2 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$, la concentración mínima fue de $1,0 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ y la máxima de $1,45 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$. En el pozo 2 que se encuentra a una distancia de 30 metros del pozo 1, las concentraciones de mercurio variaron entre $1,2 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ y $2,6 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ y un promedio de $1,9 \text{ ng/m}^3$.

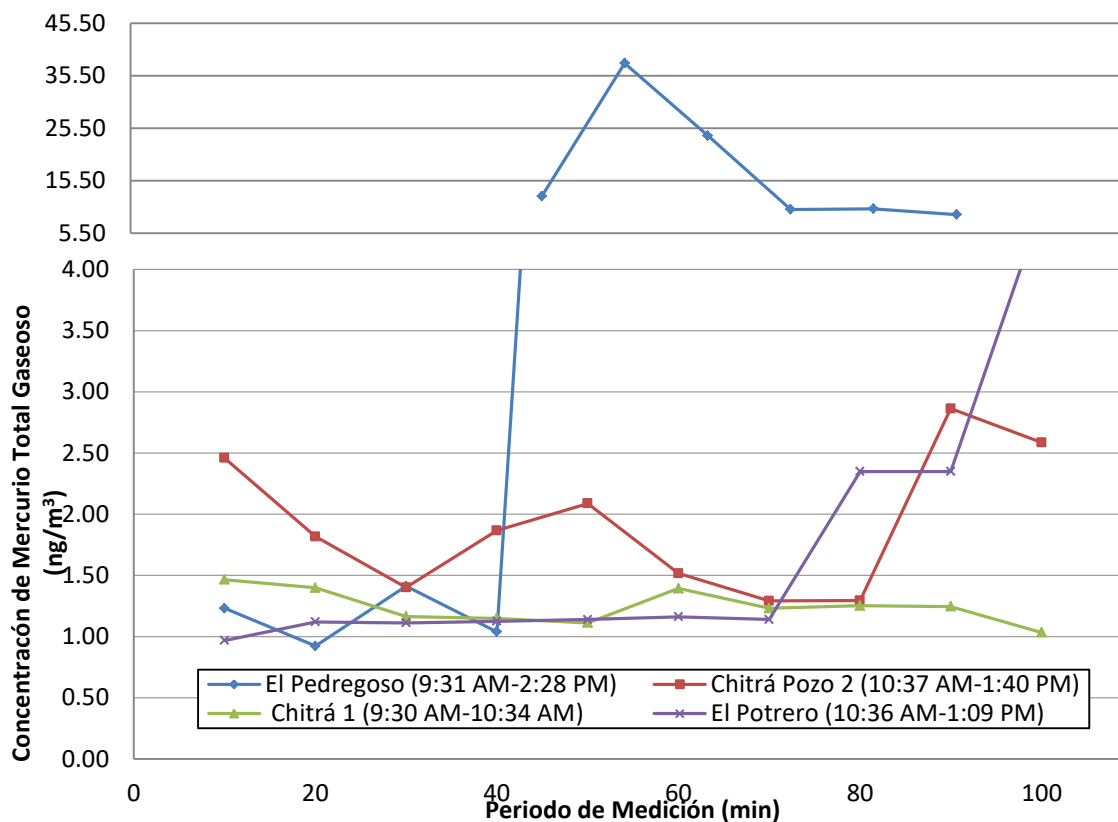


Fig.24. Variación horaria de la concentración promedio del MTG en pozos geotérmicos en Calobre, Veracruz.

De acuerdo con el cuadro 3, la concentración promedio de MTG en el pozo 4, Cotito (Fig. 7), supera 4,9 veces la concentración promedio de MTG en el Parque Yellowstone, USA y en 6,9 y 7,6 veces las concentraciones promedios reportadas en el volcán Miyake Jima, Japón y en el volcán Irazú, Costa Rica, respectivamente. (Castillo *et al.*, 2011, Hall *et al.*, 2006). Mientras que en El Cortezo, Los Santos la concentración mínima reportada fue de $0,5 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ y la máxima de $174,2 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ con un promedio de $87,4 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$, lo cual supera en 16,6 veces las concentraciones promedios emitidas por el Parque Yellowstone,

USA y 26,1 veces las concentraciones emitidas por las zonas cercanas al cráter del volcán Irazú, Costa Rica, en general se puede concluir que todos los pozos, incluyendo los no termales, Agua de Salud, Tolé (1,1 ng/m³ Hg) emiten MTG.

Cuadro 3. Comparación de las concentraciones de MTG en aire de fuentes naturales reportadas a nivel internacional y en este estudio.

Lugar	Concentración MTG (ng/m ³)	Promedio MTG (ng/m ³)	Referencia
Parque Termales Yellowstone, Estados Unidos	1,5 - 9,0	5,25	Hall <i>et al.</i> , 2006
Volcán Miyake Jima, Japón	3,700	--	Fang <i>et al.</i> , 2009
Volcán Poás, Costa Rica	403,1 - 807,0	605,0	Castillo <i>et al.</i> , 2011
Volcán Turrialba, Costa Rica	27,5 - 113,8	70,6	
Volcán Irazú, Costa Rica	0,25 - 6,45	3,35	
Chiriquí (Cotito)	15,0 - 83,0	49,0	Este Estudio
Chiriquí (Caldera)	0,5 - 4,4	2,4	
Chiriquí (Tolé)	0,5 - 2,0	1,2	
Coclé (El valle)	0,5 - 2,2	1,4	
Coclé (La Salineta)	0,8 - 3,0	1,9	
Los Santos (El Cortezo)	1,0 - 36,0	18,5	
Veraguas (El Potrero)	0,9 - 5,0	3,0	
Veraguas (Chitrá Pozos 1 y 2)	1,0 - 2,6	1,8	
Veraguas (El Pedregoso)	0,9 - 37,4	19,1	

4.5 Provincia de Panamá

En la ciudad de Panamá se llevó a cabo la quinta, sexta y séptima campaña de muestreo. Se seleccionaron tres (3) sitios de muestreo en la provincia de Panamá, ubicados en San Miguelito a un lado de la estación del Metro a 9°1'41,73" N y 79°30'25,90" O; en Albrook en la Terminal de Transporte a 8°58'29,41" N y 79°33'1,39" O y en la avenida Manuel Espinosa Batista en el Campus de la Universidad de Panamá a 8°59'13,39" N y 79°31'56,90" O.

El 06 y el 17 de febrero del 2014 se realizó el muestreo y el análisis de MTG en la Terminal de Transporte, Albrook y en el Campus de la Universidad de Panamá, respectivamente. El 19 de junio del 2015 se llevó a cabo el muestreo y la determinación analítica en las cercanías, de la estación del Metro, San Miguelito.

La ubicación de las estaciones de muestreo se observan en la figura 25.

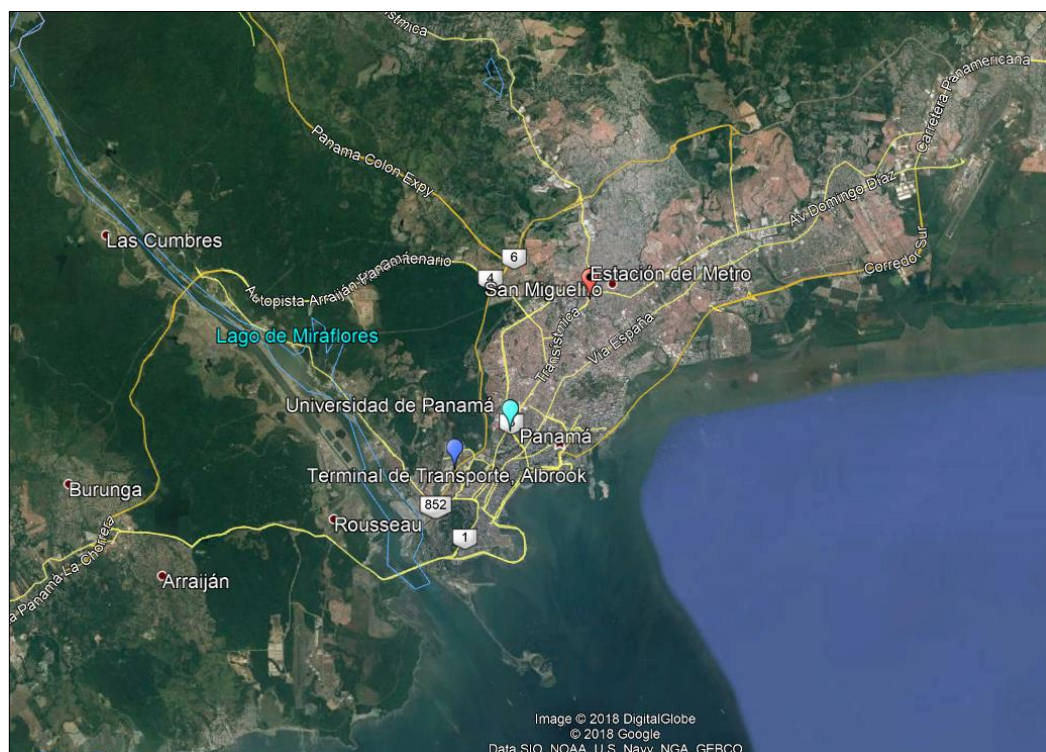


Fig. 25. Ubicación de los sitios de muestreo en la provincia de Panamá.

4.5.1 Muestreo en la Terminal de Transporte de Albrook

La Terminal Nacional de Transporte de Albrook es el principal punto de llegada y salida de todo el transporte público y privado, proveniente de todas las ciudades del país, motivo por el cual se observa gran flujo vehicular durante todo el día. En esta terminal se ubicaron tres (3) puntos de muestreo: estacionamiento (Fig. 26a); parada de buses (figura 26b) e interior de la estación.



Fig. 26. Muestreo y análisis de MTG en la Terminal de Transporte de Albright. a) Estacionamiento b) Parada de buses.

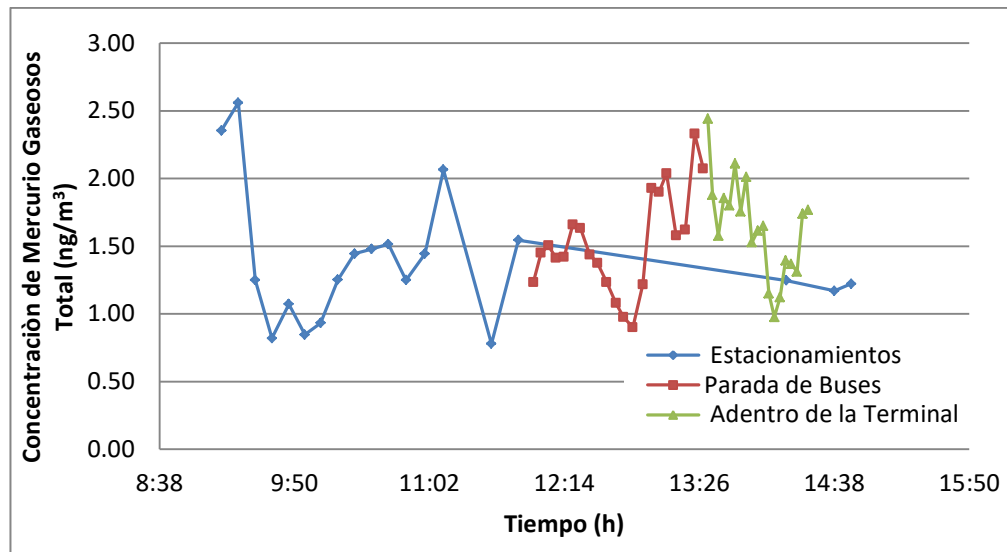


Fig.27. Variación horaria de la concentración promedio de MTG en la Terminal de Transporte de Albrook.

En la figura 27 se presentan las variaciones de las concentraciones promedios de MTG en la Terminal de Albrook y se observa que en las zona externa (estacionamiento) al edificio de la terminal, las concentraciones de MTG oscilaron entre 0,8 ng/m³ Hg y 2,6 ng/m³ Hg con un valor promedio de 1,7 ng/m³ Hg, entre las 9:11h y las 11:35 h, a partir de la cual aumentó a 1,54 ng/m³ Hg a las 11:49 h y disminuyó paulatinamente a 1,17 ng/m³ Hg a las 14:38 h. Durante las mediciones realizadas en esta zona se midieron concentraciones mínimas y máximas de 0,5 ng/m³ Hg y 37,0 ng/m³ Hg, respectivamente.

Tal y como se muestra en la figura 27, en la parada de buses, las concentraciones mínimas y máximas promedio oscilaron entre 0,9 ng/m³ Hg y 2,4 ng/m³ Hg, respectivamente con un promedio de 1,6 ng/m³ Hg. En el interior

de la Terminal las concentraciones de MTG presentaron un mínimo de 0,98 ng/m³ Hg, un máximo de 2,4 ng/m³ Hg con un promedio de 1,7 ng/m³ Hg.

De las tres (3) zonas estudiadas, la externa (estacionamientos) presentó concentraciones aproximadamente 7 veces más altas que la encontrada en la parada de buses y 12 veces más altas que la medida en el interior de la estación.

4.5.2 Muestreo en el Campus de la Universidad de Panamá y en la Estación del Metro, San Miguelito

El punto de muestreo ubicado en el Campus Universitario Octavio Méndez Pereira, específicamente en la Vía Simón Bolívar, con la intersección de la Vía Manuel Espinoza Batista y José De Fábrega (figura 28), está rodeado de zonas comerciales y residenciales, estaciones de gasolina en los cuatro puntos cardinales, al norte y noreste colinda con una zona industrial y tiene la característica de que el flujo vehicular es intenso durante todas las horas del día, agravándose en las horas pico. La estación ubicada en San Miguelito (figura 29) lugar con alta densidad de población, el movimiento vehicular es muy lento e intenso, debido a la intersección que conduce a diferentes zonas del distrito.



Fig. 28. Muestreo y análisis de MTG en el Campus de la Universidad de Panamá.

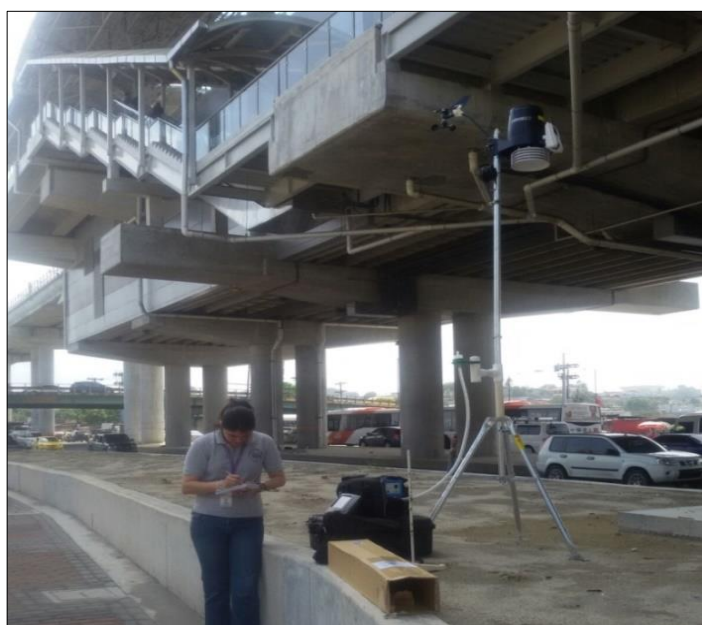


Fig. 29. Muestreo y análisis en las cercanías de la Estación del Metro, San Miguelito.

La figura 30 nos permite comparar la variación de las concentraciones de MTG en las tres (3) estaciones ubicadas en ambiente externo, Albook, Universidad de Panamá y San Miguelito, en días diferentes y durante las mismas horas de muestreo. Se observa que las concentraciones de MTG en la Universidad de Panamá variaron entre 0,5 ng/m³ Hg y 1,72 ng/m³ Hg, con un promedio de 1,1 ng/m³ Hg. La concentración mínima fue de 0,5 ng/m³ Hg y la máxima de 6,7 ng/m³ Hg, mientras que en San Miguelito, la concentración del MTG varió de 1,3 ng/m³ Hg a 2,9 ng/m³ Hg, con un promedio de 2,1 ng/m³ Hg. En la figura 30 también se observa que las concentraciones promedios más altas de MTG se obtuvieron en la estación ubicada en San Miguelito, esto probablemente, debido a la gran cantidad de tráfico automotor y continuo estancamiento de la circulación vehicular, lo que aumentó, no solo la concentración promedio de MTG, sino también de la contaminación del aire en la zona, producto de la combustión de los combustibles fósiles utilizados por el parque vehicular. Si consideramos la influencia del viento, podemos concluir que su comportamiento es igual en todos los puntos de muestreos, debido a que la distancia entre los tres puntos no es significativa y que la diferencia entre las concentraciones de MTG se debe fundamentalmente a las emisiones generadas por la alta densidad del tráfico.

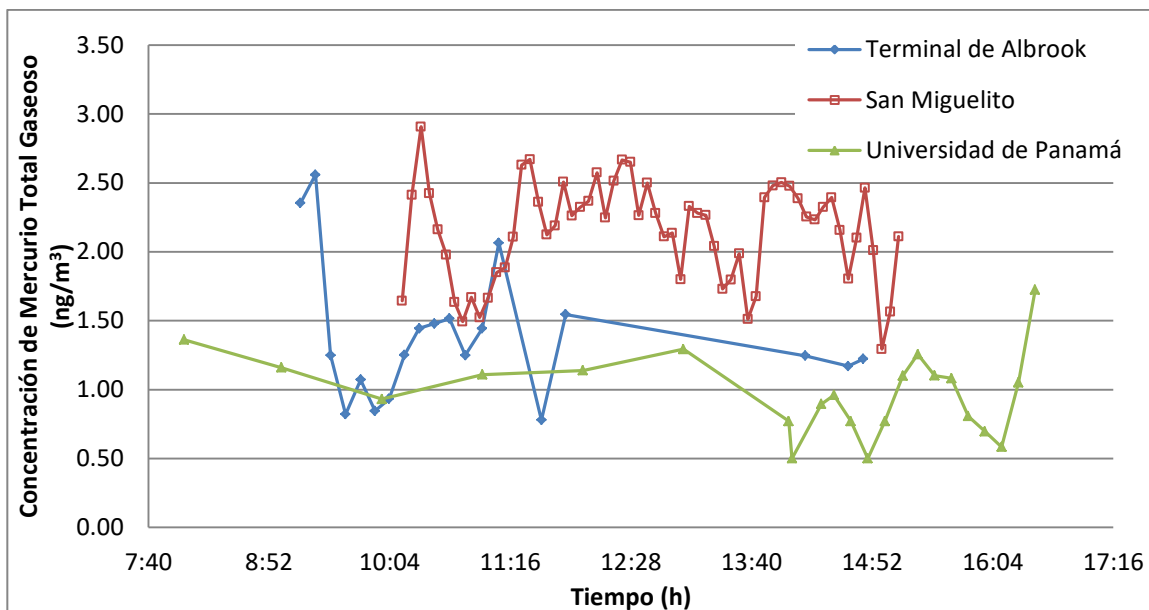


Fig.30. Variación horaria de la concentración promedio del MTG en la Terminal de Transporte de Albrook, San Miguelito y el Campus de la Universidad de Panamá.

Las variaciones de las concentraciones promedios más altas, encontradas en ambiente externo, medidas en diferentes días, a las mismas horas (10:00 h - 15:00 h), en los tres (3) puntos ubicados en la ciudad de Panamá, están por debajo de las concentraciones promedios más altas de las ciudades presentadas en el cuadro 4, con excepción de New York, Estados Unidos. La concentración promedio obtenida en San Miguelito fue 3,1 % mayor que la reportada para Turrialba, Costa Rica y menor en un 7 % que la reportada en New York, Estados Unidos.

Cuadro 4. Comparación de las concentraciones de MTG en aire de fuentes antropogénicas reportadas a nivel internacional y en este estudio.

Lugar	Concentración MTG (ng/m ³)	Concentración promedio (ng/m ³)	Referencia
Beijing, China	3,80 - 22,20	13,00	Liu <i>et al.</i> , 2002
Zacatecas, México	0,26 – 702,00	351,13	De la Rosa <i>et al.</i> , 2004
México D. F.	2,80 – 34,21	18,50	
New York, Estados Unidos	1,85 - 3,03	2,44	Han <i>et al.</i> , 2004
San Luis, CR	1,03 – 628,20	314,62	Castillo <i>et al.</i> , 2011
Grecia, CR	1,48 – 442,83	222,16	
San José, Alajuela, Costa Rica	0,40 – 15,30	7,85	
Universidad Nacional, Costa Rica	0,48 – 903,27	451,88	
	0,32 – 135,00	67,66	
Turrialba, Costa Rica	0,54 – 3,87	2,21	
Terminal de Transporte de Albrook	1,25 – 2,06	1,66	Este Estudio
Campus de la Universidad de Panamá	0,5 – 1,29	0,90	
Estación del metro en San Miguelito	1,64 – 2,91	2,28	

La figura 31 muestra la variación de la concentración de MTG con la velocidad del viento y la temperatura. Se observa que el 19 de junio del 2015, la velocidad del viento varió entre 1,8 m/s y 3,1 m/s, desde las 10:00 h hasta las 14:45 h, con temperaturas que oscilaron entre los 30,3 °C y los 34,3 °C respectivamente y concentraciones de 1,52 ng/m³ Hg a 2,46 ng/m³ Hg. La velocidad del viento se mantuvo constante por una hora desde las 12:15 horas hasta las 13:15 h, con una velocidad promedio de 2,7 m/s y una concentración

de $2,39 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ Se observó una predominancia del viento proveniente del sector noroeste, con algunas variaciones desde el sector sureste. Las concentraciones disminuyeron desde la 12:30 hasta las 13:38 h de $2,67 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ a $1,51 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ y posteriormente subieron a $2,39 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ manteniéndose constante hasta las 14:48 h con una concentración de $2,46 \text{ ng/m}^3 \text{ Hg}$ a $34,3 \text{ }^\circ\text{C}$.

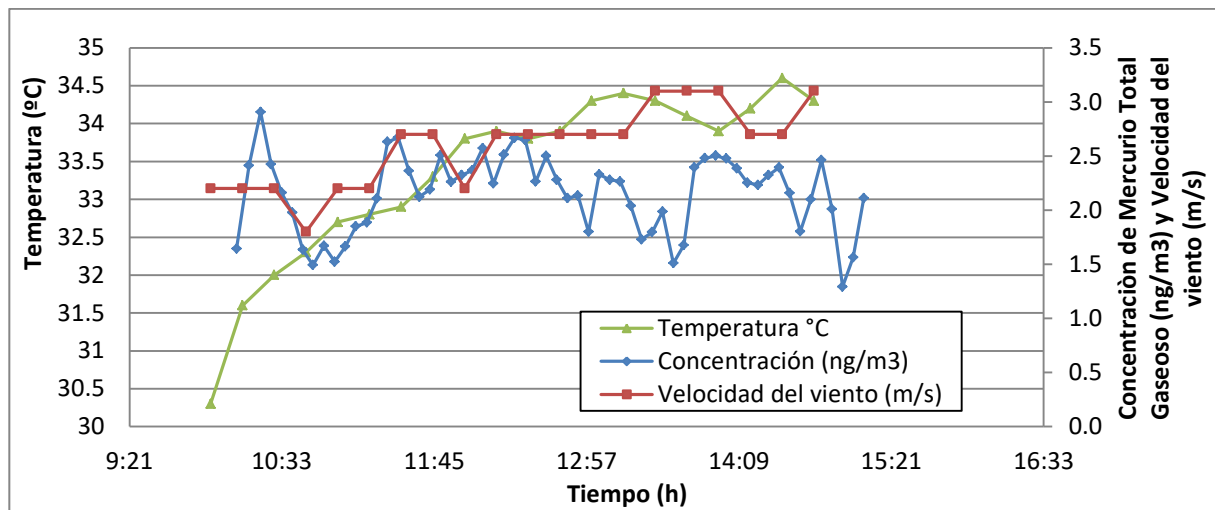


Fig. 31. Variación de la concentración del MTG con la velocidad del viento y la temperatura el 19 de junio 2015, Estación del Metro, San Miguelito.

En la figura 31, se observa que el 19 de junio, la temperatura en San Miguelito varió entre $30,3 \text{ }^\circ\text{C}$ y $34,6 \text{ }^\circ\text{C}$ y que la concentración del MTG aumentó de $0,25 \text{ ng/m}^3$ a $2,75 \text{ ng/m}^3$ al aumentar la temperatura. Esta información concuerda con los datos obtenidos por Castillo et al, 2004, en donde la concentración del MTG aumenta al aumentar la temperatura. La humedad relativa promedio fue del 56 % y la velocidad promedio del viento fue de $2,7 \pm 0,1 \text{ m/s}$.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. Conclusiones

- La medición de los valores de mercurio gaseosos total, contribuirá a crear un índice que permitirá conocer la concentración en emisiones y vertimientos como medida de control de calidad en la atmósfera panameña.
- La realización de este control de calidad, contribuirá a conocer; si la salud humana y la ambiental se encuentra en riesgo por la presencia de este tóxico en nuestra atmósfera.
- La espectroscopia diferencial Zeeman, utilizando la modulación de alta frecuencia de luz polarizada, constituye una metodología automática a determinar la concentración de una especie química relativamente libre de interferencias; con alta sensibilidad (no hay procedimientos de pretratamientos requeridos) permitiendo el análisis de las muestras de matriz compleja en sólidos y líquidos a bajos límites de detección.
- La República de Panamá, tiene aprobado El Convenio de Minamata relacionado con la emisión de mercurio total gaseoso (MTG).
- En cumplimiento de este Convenio; la República de Panamá, debe medir las emisiones de mercurio gaseoso total en su atmósfera.
- La presente tesis (trabajo científico) midió concentraciones de MTG en diferentes sitios provinciales de Panamá con valores desde 0,5 ng/m³ Hg hasta 94,0 ng/m³ Hg.
- La concentración del MTG en la provincia de Panamá (Terminal de Transporte de Albrook, Campus de la Universidad de Panamá y

Estación del metro en San Miguelito) varió entre 0,50 ng/m³ Hg y 2,91 ng/m³ Hg con promedios desde 0,9 ng/m³ Hg a 2,28 ng/m³.

- En la provincia de Veraguas (Pozos termales de El Potrero, Pozos de aguas termales de Chitrá y Pozos termales del Pedregoso) las concentraciones variaron entre 0,8 ng/m³ Hg y 37,4 ng/m³ Hg, con promedios de 1,2 ng/m³ Hg a 23,2 ng/m³ Hg.
- En la provincia de Coclé (Pozos de aguas termales del Valle de Antón y Pozos de agua salada de La Salineta) varió entre 0,5 ng/m³ Hg y 3,6 ng/m³ Hg con promedios de 1,40 ng/m³ Hg y 2,0 ng/m³ Hg.
- En Los Santos, El Cortezo la concentración fue de 1,0 y 36,0 ng/m³ Hg, con un promedio de 18,5 ng / m³ Hg.
- En la provincia de Chiriquí (Pozos de aguas termales de Cotito, Pozos de aguas termales de Caldera y Pozos de agua potable de Salud) las concentraciones variaron entre 0,5 ng/m³ Hg y 83,0 ng/m³ Hg.
- En las zonas cercanas a los pozos termales se obtuvieron las mayores concentraciones de MGT (94,0 ng/m³ Hg).

5.1. Recomendaciones

- Estudiar la meteorología y la composición de las aguas y de los suelos de los pozos termales en la República de Panamá en época seca, lluviosa y lluviosa.

- Evaluar las reacciones de los compuestos orgánicos e inorgánicos de mercurio en agua, aire, suelo y organismos vivos acuáticos y terrestres, así como en productos agrícolas y no agrícolas nacionales e importados.
- Realizar mediciones de radiación solar, comparándolas con las concentraciones de mercurio total gaseoso obtenidos en los puntos de muestreo realizados en las provincia de Panamá, Veraguas, Coclé, Los Santos y Chiriquí.
- Determinar la emisión de mercurio total gaseoso del suelo en futuros trabajos de investigación.
- Determinar mercurio elemental, mercurio reactivo y mercurio particulado, en el aire.
- Realizar estudios sobre la variación de la concentración de mercurio total gaseoso en todo el país, así como estudios permanentes en zonas volcánicas y comparar si existe variación de la concentración de mercurio total gaseoso durante la época seca y la lluviosa.
- Realizar un inventario de emisiones de mercurio en aguas, suelos, aire, especies vegetales, carne y diversos alimentos, con el fin de establecer normativa y legislación para cada uno de los sustratos estudiados.
- Apoyar nuevos estudios relacionados con las diferentes formas de mercurio presentes en aire, agua de todo tipo, suelo, flora, seres vivos, zonas mineras y sus alrededores, con el fin de conocer sus concentraciones y efectos sobre los recursos antes indicados.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS

Agencia de Protección del Medio Ambiente de Los Estados Unidos.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. 1999. Toxicological profile for mercury. Division of Toxicology Information Branch 1600 Atlanta, Georgia, 64-78.

BOSZKE, L., A. KOWALSKI, G. GLOSINSKA, R. SZAREK, J. SIEPAK. 2003. Environmental factors affecting speciation of mercury in the bottom sediments. Polish J. Environ studies. 12: 5-13.

CASTILLO, E., 2011. Seasonal and diel patterns of total gaseous mercury concentration in the atmosphere of the Central Valley of Costa Rica; 26: 242–248
CLARKSON, T. 2002. Review: The three modern faces of mercury. Environ. Health Persp. 110: 11-23.

Congreso Nacional del medio Ambiente, España. 2004. Un caso de contaminación milenaria: el Distrito de Almadén, 5-8.

Cursino, L., S. Mattos, N. Silva, E. Chartone-Souza, A. Nascimento. 2003. Measurement of volatilized mercury by a mini-system: a simple, reliable and reproducible technique. Braz. Arch Biol Tech. 46: 731-734.

CYTED. 2001. Jornada Internacional sobre el impacto ambiental del mercurio utilizado por la minería aurífera artesanal en Iberoamérica. Lima, Perú, 12-23.

EBADIAN, M., M. ALLEN; Y. CAI; J.; MCGAHAN. 2001. Mercury contaminated material decontamination methods: Investigation and assessment. Prepared for: U.S. Department of Energy Office of Environmental Management Office of Science and Technology, 3–7.

European Commission Science Research and Development, Environment and Climate Programme 1994-1998, Swedish Environmental Research Institute. 2006. Final Report Mercury Species Over Europe (MOE) Mercury Species over Europe. Relative Importance of Depositional Methylmercury Fluxes to Various Ecosystem, 100 –110.

European Environmental Bureau (EBB), European Public Health Alliance, Health Care Without Harm Europe. 2005. Key issues and policy recommendations for the EU strategy on mercury, 34–47.

GAN, W., W. SHI, Q. SU. 2004. Simultaneous determination of trace mercury and cadmium in tobacco samples by cold vapor generation-atomic fluorescence Spectrometry. *Anal. At. Spectrom.* 2004: 911–916.

GRIGAL, D. 2012. Inputs and outputs of mercury from terrestrial watersheds: a review; 10: 1–39 International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) Analytical Chemistry Division Commission of Microchemical Techniques and Trace Analysis Working Group on Speciation. 1998. The Determination of Mercury Species in Environmental and Biological Samples. *Pure Appl. Chem.*, 70: 1585-1615.

JAFFE, D., E. PRESTBO, P. SWARTZENDRUBER, P. WEISS-PENZIA, S. KATO, A. TAKAMI, S. HATAKEYAMA, Y. KAJII. 2005. Export of atmospheric mercury from Asia. *Atmos. Environ.* 39: 3029–3038.

KOIRTYOHANN, S., M. KHALIL. 1976. Variables in the Determination of Mercury by Cold Vapour Atomic Absorption. *Anal. Chem.* 48: 136-139.

KRUG, E., D. WINSTANLEY. 2004. Comparison of mercury in atmospheric deposition and in Illinois and USA soil. *Hidrol. Earth Sys. Sci.* 8: 98-102.

LACERDA, L., M. SOUZA, M. RIBEIRO. 2004. The effects of land use change on mercury distribution in soils of Alta Floresta, Southern Amazon. *Environ. Poll.* 129: 247–255.

LEERMAKERS, M., W. BAEYENS, P. QUEVAUVILLER, M. HORVAT. 2005. Mercury in environmental samples: Speciation, artifacts and validation. *Trends in Anal. Chem.*, 24: 383-393.

MANAHAN, S. 1991. *Environmental Chemistry*. Lewis Publishers. 5ª Edición. Michigan, United States of America. 1-3, 150-153, 258-259, 504-505, 537.

Manual de uso Lumex. Mercury analyzer RA-915+, 4-8

Marins, R., H. Paraquetti, G. Ayres. 2002. Alternativa Analítica para Especificação físico-química de Mercúrio em Aguas Costeiras Tropicais. Quim. Nova, 25: 372-378, 2002.

MARSIK, F. 2005. Air-Surface Exchange of Gaseous Mercury over A Mixed Nevada Division of Environmental Protection (NDEP). 2006. Nevada Mercury Air Emissions Control, 1-8.

OLMEZ, I., M. AMES. 1997. Atmospheric mercury: How much do we really know? Pure Anal. Chem., 69: 35-40.

PIRRONE, N., G. KEELER, J. NRIAGU. 1996. Regional differences in worldwide emissions of mercury to the atmosphere. Atmos. Environ. 30: 2981-2987.

Poissant, L., M. Pilote. 2004. Atmospheric mercury speciation and deposition in the Bay St. François wetlands. J. Geophys. Res., 109: D11301, doi: 10.1029/2003JD004364.

POISSANT, M. 2004. Atmospheric mercury speciation and deposition in the Bay St. François wetlands. J. Geophys. Res., 109: D11301, doi: 10.1029/2003JD004364.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 2005. Naciones Unidas, Productos Químicos Evaluación Mundial sobre el Mercurio. Publicado por el PNUMA Productos Químicos Ginebra, Suiza, 27-54.

PYLE, D., M. TAMSIN. 2003. The importance of volcanic emissions for the global atmospheric mercury cycle. Atmos. Environ. 37: 5115-5124.

RAMOS, C., R. FERNÁNDEZ, P. GARCÍA, SANTOS-ALVÉS. 2005. Total Gaseous Mercury Evaluation in Different Stations: Urban, Suburban, Industrial, and Background. Urban Air Quality 2005. Valencia, Spain 29-31 March.

ROUSTAN, Y., M. BOCQUET. 2006. Inverse modelling for mercury over Europe. Atmos. Chem. Phys., 6: 3085–3098.

Sawgrass-Cattail Stand within the Florida Everglades; 39: 4739-4746

SEGADE, S., C. BENDICHO. 1999. Ultrasound-assisted extraction for mercury speciation by the flow injection–cold vapor technique. *J. Anal. At. Spectrom.*, 14: 263–268.

Siegel, S., B. Siegel. 1984. First estimate of annual mercury flux at the Kilauea main vent. *Nature* 309: 146–147.

SIRI, S. 2002. Development of a method for the sampling and determination of particulate mercury in the atmosphere. Thesis degree of candidata scientiarum. Department of Chemistry Norwegian University of Science and Technology, 15-32.

SIRIVARASAI, J, S. KAOJARERN. 2003. Mercury and its impacts on health. division of clinical pharmacology and Toxicology, Department of Medicine, Faculty of Medicine, Ramathibodi Hospital, Mahidol University, Bangkok, 4-6.

SOMMAR, J., X. FENG, K. GA, O. LINDQVIST. 1999. Measurements of fractionated gaseous mercury concentrations over northwestern and Central Europe, 1995–99. *J. Environ. Monit.*, 1: 435–439.

Steffen, A., T. Douglas, M. Amyo, P. Ariya, K. Aspmo, T. Berg, J. Bottenheim, S. Brooks, F. Cobbett, A. Dastoor, A. Dommergue, R. Ebinghaus, C. Ferrari, K. Gardfeldt, M. Goodsite, D. Lean, A. Poulain, C. Scherz, H. Skov, J. Sommar, C. Temme. 2007. A synthesis of atmospheric mercury depletion event chemistry linking atmosphere, snow and water. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 7: 10837–10931.

STEINNES, E. 2006. Metal contamination of natural surface soils from long-range atmospheric transport: Existing and missing knowledge; 14(3): 169-186
United Nations Environment Programme (UNEP) Chemicals. 2002. Global Mercury Assessment, 1-27.

VAREKAMP, J., P. BUSECK. 1981. Mercury emissions from Mount St Helens during September 1980. *Nature* 293: 555–556.

ANEXO

Hoja de datos proporcionada por el Software Lumex Datalogger

41687,3348	0	0,1	1
41687,3349	10	0	1
41687,335	20	0	2
41687,3351	30	0	2
41687,3353	40	3	1
41687,3354	50	2,2	1
41687,3355	60	2,1	0
41687,3356	70	1,6	0
41687,3357	80	2	0
41687,3358	90	1,8	0
41687,3359	100	1,8	0
41687,3361	110	1,8	0
41687,3362	120	1,7	0
41687,3363	130	1,7	0
41687,3364	140	1,5	0
41687,3365	150	1,7	0
41687,3366	160	2	0
41687,3368	170	1,6	0
41687,3369	180	1,4	0
41687,337	190	1,9	0
41687,3371	200	1,8	0
41687,3372	210	1,8	0
41687,3373	220	1,7	0
41687,3375	230	1,9	0
41687,3376	240	1,7	0
41687,3377	250	1,7	0
41687,3378	260	1,4	0
41687,3379	270	1,8	0
41687,338	280	1,3	0
41687,3381	290	1,3	0
41687,3383	300	1,8	0
41687,3384	310	1,7	0
41687,3385	320	1,4	0
41687,3386	330	1,8	0
41687,3387	340	1,6	0
41687,3388	350	1,6	0
41687,339	360	1,7	0
41687,3391	370	1,8	0
41687,3392	380	1,5	0
41687,3393	390	1,3	0